

# Tillskottsbevattning i vårsäd – effekter på markvattenbalans och skörd

Åsa Larsson



**Självständigt arbete • 30 hp**

Agronomprogrammet mark/växt

Uppsala 2020

# Tillskottsbevattning i vårsäd – effekter på markvattenbalans och skörd

Åsa Larsson

**Handledare:** Ingrid Wesström, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö

**Examinator:** Jennie Barron, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö

**Omfattning:** 30 hp

**Nivå och fördjupning:** Avancerad nivå, A2E

**Kurstitel:** Självständigt arbete i markvetenskap

**Kursansvarig inst.:** Institutionen för mark och miljö

**Kurskod:** EX0881

**Program/utbildning:** Agronomprogrammet mark/växt

**Utgivningsort:** Uppsala

**Utgivningsår:** 2020

**Omslagsbild:** Åsa Larsson

**Elektronisk publicering:** <https://stud.epsilon.slu.se>

**Nyckelord:** Bevattning, markvattenmagasin, markvattenhaltsmätningar, anpassad evapotranspiration, stressfaktor, vattenhushållning

**Sveriges lantbruksuniversitet**

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för mark och miljö

## Sammanfattning

Vattenbrist är den vanligaste skördebegränsande faktorn i världen och kommer sannolikt, både i Sverige och globalt öka i takt med klimatförändringarna. Samtidigt har Sverige förbundit sig till Agenda 2030 och en effektiv vattenanvändning. I försöken L1-265 och L1-266 har Sveriges lantbruksuniversitet, SLU, studerat strategier för optimal vattenresursanvändning i spannmål utifrån det svenska lantbrukets förutsättningar under 2017–2019. Syftet i den här uppsatsen är att utvärdera effekterna av tillskottsbevattning i vårsäd genom att studera markvattenbalanser och skördenivåer i Ekeby, Gotland, som är en av de tre försöksplatserna som ingår i försöksserien.

Försöket bestod av fyra behandlingar; obevattnat, optimal bevattning, tidig bevattning och sen bevattning. Markvattenbalansen studerades genom en beräkningsmodell för markvattenmagasin samt genom att utvärdera uppmätta markvattenhalter i fält. Beräkningsmodellen grundas på FAO Irrigation and Drainage Paper no 56 samt markdata. Mätningarna av markvattenhalten är utförda genom att mäta vattenhalten på sex olika djup ned till 1 meter.

Försökets tre växtsäsonger var generellt sett torra, framförallt extremåret 2018. Beräknade markvattenhalter styrs till stor del av vattenbristens stressfaktor som i sin tur kraftigt påverkar evapotranspirationen. De uppmätta markvattenhalterna visar på oklara resultat. Vid en jämförelse av metoderna visar markvattenhaltsmätningarna lägre värden än de beräknade år 2017 medan 2018 och 2019 uppvisade de beräknade värden lägre vattenhalter än de uppmätta. Vattenhaltsmätningens metod behöver utvärderas på grund av oklara resultat.

Respektive försöksårs skördedata bearbetades och analyserades var för sig och det fanns en signifikant skillnad mellan behandlingarna alla år. År 2017 ökade skörden med tidig bevattning 10 % och gav en merskörd på 26 kg per mm bevattning<sup>-1</sup>. Det väldigt torra året, 2018, gav optimal bevattning en skördeökning på 128 % och en merskörd på 22 kg per mm bevattning. Försökets sista år, 2019, gav optimal och tidig bevattning 23 respektive 22 % skördeökning och en merskörd på 24 och 22 kg per mm. Högst merskörd gav sen bevattning, 28 kg per mm bevattning. Försöket visar på goda skördeökningar men med stor variation i merskörd mellan år och behandlingar beroende på variationer i väderlek under växtsäsongen.

*Nyckelord:* Bevattning, markvattenmagasin, markvattenhaltsmätningar, anpassad evapotranspiration, stressfaktor, vattenhushållning

## Abstract

Globally, water is the single most limiting factor for agricultural production. Due to climate change, water is likely to be even more scarce in the future. In the field trials L1-265 and L1-266, Swedish University of Agricultural Sciences, SLU, studied strategies for an optimal water-use efficiency in cereal cropping during the years 2017–2019. The aim of this thesis was to evaluate the effects of supplemental irrigation in spring cereals by studying the soil water balance and yields. One of the three locations for the field trials was in Ekeby, Gotland.

The trial consisted of four different treatments; (a) no irrigation, (b) optimal irrigation, (c) early irrigation and (d) late irrigation. The soil water balance was studied with a model for crop water requirements based on FAO Irrigation and Drainage Paper no 56.

The calculated soil water balance was compared with soil water measurements. Measurements were made through measuring of the water content at six different depths down to one meter.

The years 2017–2019 were generally dry, especially year 2018. The calculated soil water content was to some extent controlled by the Soil water coefficient, which strongly affects the evapotranspiration. The measured soil water content gave unclear results. In 2017 the measured soil water content had lower values than the calculated values, and in 2018 and 2019 the measured values gave higher values than the calculated ones. The methods used for measurement must therefore be evaluated.

Yield data was analysed each year separately and there was a significant difference between all treatments every year. In 2017, the yield increased with 10% in the early irrigated treatment corresponding to an increase of 26 kg per mm irrigation. The very dry year, 2018, the optimal irrigated treatment increased the yield with 128 % and had a yield increase of 22 kg per mm irrigation. In 2019, the optimal and early irrigated treatment gave a yield increase of 23 respectively 22 % corresponding to an increase on 24 and 22 kg per mm irrigation. The late irrigated treatment had the highest yield of 28 kg per mm irrigation. The trials shows an increase in yield but with high variation in yield increase between both years and treatments due to variations in climate conditions.

*Keyword:* Irrigation, soil water content, soil water measurements, adjusted evapotranspiration, soil water coefficient, water management

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Är det ekonomiskt lönsamt för lantbrukare i södra Sverige att bevattna spannmål? I ett treårigt försök under åren 2017–2019 studerades effekterna av att tillskottsbevattna spannmål i södra Sverige.

Skördeökningen i försöket vid extremt torra år är hög, upp till 128 %. Även under mer normala år är skördeökningen hög och upp till 23 %. Variationerna är stora men samtliga bevattningsstrategier gav en skördeökning under åren som försöket pågick. Samtidigt är bevattning kostsamt och kostnaden brukar ofta relateras till den extra skörd varje millimeter bevattning ger upphov till. Att endast titta på skördeökningen kan bli missvisande då det är den optimala skörden som kan främja ett konkurrenskraftigt jordbruk. Genom att studera den merskörd bevattningen ger upphov till syns samma trend, bevattning gav en merskörd på 1–28 kg kärnskörd per millimeter bevattning.

Frågan är då när grödan ska bevattnas för bästa effekt. Detta kan studien inte svara på utan kräver vidare forskning men resultaten indikerar på att tidig bevattning ger bäst utslag.

I studien ingick också uppskattningar av hur markvattenmagasinet, det vill säga den mängd vatten som är tillgängligt för grödan, varierade mellan olika bevattningsstrategier. Detta gjordes både genom att mäta vattenhalten ute i fält och med hjälp av modeller som bygger på klimat- och markdata. Dessa två metoder har jämförts men inga generella slutsatser kan dras, förutom att det är svårt att uppskatta hur mycket vatten det finns i marken.

Att planera sin bevattning är svårt och för att underlätta för svenska spannmålsproducenter borde en användarvänlig programvara, grundad på generell data med viss platsspecifik data utvecklas. Rätt insatser vid rätt tidpunkt gynnar det svenska lantbruket.

# Innehållsförteckning

<b>Tabellförteckning</b>	<b>7</b>
<b>Figurförteckning</b>	<b>8</b>
<b>Förkortningar</b>	<b>9</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>10</b>
1.1 Syfte	11
<b>2 Bakgrund</b>	<b>12</b>
2.1 Tillskottsbevattning	12
2.2 Beräkningsmodell för markvattenmagasin	13
2.2.1 Evapotranspiration	13
2.2.2 Vattenstress	14
2.3 Mätmetoder för vattenhalten i marken	16
2.4 Skörderespons i relation till vatten	17
2.4.1 Durumvete	17
2.4.2 Tidigare bevattningsstudier på spannmål	18
<b>3 Metod och material</b>	<b>20</b>
3.1 Beskrivning av fältförsök L1-266	20
3.2 Beräkningsmodell för markens vattenhalt	22
3.2.1 Evapotranspiration	22
3.2.2 Markdata	24
3.2.3 Stressfaktor	25
3.3 Markvattenhaltsmätningar	26
3.4 Skördedata	26
<b>4 Resultat</b>	<b>28</b>
4.1 Beräkningsmodell för evapotranspiration och markvattenmagasin	28
4.1.1 2017	28
4.1.2 2018	30
4.1.3 2019	31
4.1.4 Beräknade markvattenmagasin	32
4.2 Markvattenhaltsmätningar	33
4.2.1 2017	33
4.2.2 2018	34

4.2.3	2019	35
4.3	Jämförelse av uppmätta markvattenmagasin och beräknade markvattenmagasin	36
4.3.1	2017	36
4.3.2	2018	37
4.3.3	2019	38
4.4	Skörd	39
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>43</b>
5.1	Beräkningsmodell för evapotranspiration och markvattenmagasin	43
5.2	Mätning av markvattenhalt	44
5.3	Jämförelse mellan beräkningar och mätningar av markvattenmagasinet	45
5.4	Tillskottsbevattningens effekt på skörden	46
5.5	Utvecklingsmöjligheter för svensk spannmålsbevattning	48
<b>6</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>49</b>
	<b>Referenslista</b>	<b>50</b>
	<b>Bilaga I</b>	<b>54</b>
	<b>Bilaga II</b>	<b>55</b>





## Tabellförteckning

Tabell 1. Medelskörd i bevattningsförsök i korn 1972–1975	19
Tabell 2. Sammanställning av såtidpunkter, gödslingsmängder samt skördedatum för respektive år	21
Tabell 3. Utvecklingsstadiernas längd för respektive år	23
Tabell 4. Textur och jordarter i Hakuse respektive den faktiska försöksplatsen	24
Tabell 5. Beräknade värden på vattenhalten vid dräneringsjämvikt	24
Tabell 6. Skördenivåer för respektive år och behandling	41

## Figurförteckning

<i>Figur 1.</i> Schematisk bild över evaporation- och transpirationsprocesserna.	14
<i>Figur 2.</i> Karta över försök L1-266 lokalisering på Gotland.	20
<i>Figur 3.</i> Beräknade $K_c$ -värden över växtsäsongerna 2017, 2018 och 2019.	23
<i>Figur 4.</i> Delta T profile probe utrustning.	26
<i>Figur 5.</i> Schematisk bild över tidpunkterna av markvattensmätningarna.	26
<i>Figur 6.</i> Beräknad evapotranspiration i respektive led för växtsäsongen 2017.	29
<i>Figur 7.</i> Beräknad evapotranspiration i respektive led för växtsäsongen 2018..	31
<i>Figur 8.</i> Beräknad evapotranspiration i respektive led för växtsäsongen 2019.	32
<i>Figur 9.</i> Beräknade markvattenmagasin växtsäsongerna 2017, 2018 och 2019.	33
<i>Figur 10.</i> Uppmätt markvattenhalt (volym- %) per skikt under växtsäsongen 2017.	34
<i>Figur 11.</i> Uppmätt markvattenhalt (volym-%) per skikt under växtsäsongen 2018.	35
<i>Figur 12.</i> Uppmätt markvattenhalt (volym-%) per skikt under växtsäsongen 2019.	36
<i>Figur 13.</i> Uppmätt och beräknat markvattenmagasin (mm) i rotzonen 2017.	37
<i>Figur 14.</i> Uppmätt och beräknat markvattenmagasin (mm) i rotzonen 2018.	38
<i>Figur 15.</i> Uppmätt och beräknat markvattenmagasin (mm) i rotzonen 2019.	39
<i>Figur 16.</i> Skördenivåer för växtsäsongerna 2017, 2018 och 2019	40
<i>Figur 17.</i> Bevattning och den merskörd ( $\text{kg mm}^{-1}$ ) det ger upphov till.	42

## Förkortningar

ET	Evapotranspiration
ET <sub>o</sub>	Potentiell evapotranspiration
ET <sub>c</sub>	Grödans evapotranspiration
ET <sub>c adj</sub>	Anpassad evapotranspiration
K <sub>c</sub>	Grödfaktor
K <sub>s</sub>	Stressfaktor
FAO	FN:s livsmedels- och jordbruksorganisation
WUE	Vatteneffektivitet
PM	FAO Penman Montheith ekvation
TAW	Totalt tillgängligt vatten
RAW	Direkt tillgängligt vatten
FC	Fältkapacitet

# 1 Inledning

Världens befolkning ökar och år 2050 förväntas 9,7 miljarder människor behöva mättas (United Nation, 2019). För att trygga livsmedelsförsörjningen i framtiden är skördeökningar, istället för att bryta mer jordbruksmark, den mest hållbara lösningen (Charles *et al.*, 2019). Samtidigt som befolkningen ökar, kommer klimatförändringarna att påverka jordbrukssystemen i större utsträckning. Redan idag är vattenbrist den vanligaste begränsande skördefaktorn och kommer troligen att öka i takt med klimatförändringarna (Allen *et al.*, 1998; Paulsen & Shroyer, 2004; Raes *et al.*, 2006a; Steduto *et al.*, 2012; Zhao, Huang & Xu, 2013; Chapman, 2019; Mbow *et al.*, 2019).

Samtidigt som vattenbristen är stor, har Sverige och FN:s övriga medlemsländer i och med Agenda 2030 förbundit sig till att effektivisera vattenanvändningen inom alla sektorer (Regeringskansliet, 2016). En metod för en mer effektiv vattenanvändning är tillskottsbevattning. I bevattningsstrategin tillsätts bara vatten under de mest kritiska utvecklingsstadierna för att på så sätt öka effektiviteten i vattenanvändningen (Nangia *et al.* 2018).

I takt med klimatförändringarna måste även det svenska jordbruket anpassa sig till förändrade nederbördsmonster (Wesström & Joel, 2014; Bernes, 2016). Med förväntade, ökande problem med tillfällig torka i landets jordbruksregioner (Bernes, 2016) måste spannmålsodlingen, som är viktig både ur samhälls- och lantbrukarperspektiv, säkras och utvecklas. I Sverige är vete den vanligaste spannmålsgrödan och odlas årligen på drygt 400 000 hektar med en medelskörd på 6 ton per hektar (Fogelfors, 2015). Skördeutvecklingen har stagnerat de sista decennierna och skördeökningen är lägre i Sverige än i andra europeiska länder (Elmqvist & Arvidsson, 2014). Elmqvist och Andersson (2014) bedömde inom samverkansprojektet Höst-vete mot nya höjder, att medelskörden i Sverige borde kunna öka med 20 % från 2014 till 2024. Inom projektet identifierades ett flertal orsaker till stagnationen varav bevattning var en av dessa.

I försöken L1-265 och L1-266 har SLU studerat strategier för optimal vattenresursanvändning i spannmål utifrån det svenska lantbrukets förutsättningar under

åren 2017–2019. Underlag för bevattningsplanering kan grundas på kostsamma markvattenhaltsmätningar eller klimatiska beräkningsmodeller. FAO (FN:s livsmedels- och jordbruksorganisation) har utarbetat riktlinjer för beräkningar av evapotranspiration (ET) och markvattenmagasin i rapporten *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56* (FAO nr 56). Riktlinjerna i FAOs rapport är lokalt anpassningsbara och kan användas till både bevattnade och obevattnade odlingssystem.

## 1.1 Syfte

Syftet är att utvärdera effekterna på markvattenbalans och skörd av tillskottsbevattning i vårsäd. Genom att jämföra en modell för vattenhalter i marken grundad på dagliga vattenbalansberäkningar med uppmätta vattenhaltsmätningar i fält ska markvattenbalansen utvärderas. Uppsatsen ska även studera tillskottsbevattningens kvantitativa påverkan på skörden och den merskörd bevattning ger upphov till.

Huvudfrågorna i detta arbete är:

- I. Hur väl fungerar dagliga vattenhaltsberäkningar för att beräkna markvattenmagasinet?
- II. Vilken påverkan har vattenbristens stressfaktor på den beräknade evapotranspirationen?
- III. Hur väl stämmer markvattenmagasin, beräknat med vattenbalansmodellen, överens med uppmätta markvattenmagasin?
- IV. Vilken effekt har tillskottsbevattning under olika faser av grödans utveckling på den kvantitativa spannmålsskörden?

## 2 Bakgrund

Nedan följer en genomgång av bakgrundsinformationen till uppsatsens metod och resultat. Beräkningsmodellens variabler förklaras samt metoder som kan användas för att mäta vattenhalten i marken beskrivs. Hur bevattning relaterar till skördeökningar i tidigare studier förklaras i slutet av bakgrundskapitlet.

### 2.1 Tillskottsbevattning

I världen används 70 % av sötvattenuttaget till bevattning av jordbruksmark (FAO, 2017). Samtidigt står det obevattnade jordbruket för 80 % av världens jordbruksareal och två tredjedelar av världens livsmedelsproduktion (Rockström *et al.*, 2010).

I Sverige bevattnas inte spannmål i någon större utsträckning utan endast högvärdesgrödor såsom potatis och grönsaker. Årligen bevattnas oftast mindre än 100 000 hektar vilket motsvaras av 3,5 % av den totala odlingsarealen (Jordbruksverket, 2018). Jordbrukssektorn använder 75 miljoner kubikmeter vilket motsvaras av 3 % av det årliga sötvattenuttaget (SCB, 2017). Skillnaden mellan länen är stor och på Gotland står jordbruket för 47 % av länets totala vattenanvändning (SCB, 2017).

Bestämning av bevattningsbehov och tidpunkt för bevattning grundar sig på tre principer. (1) Fastställande av markfuktighet, (2) klimatiska vattenbalansberäkningar och (3) bestämning av växtparametrar (Chapman, 2019). Det bästa är att kunna mäta markfuktigheten kontinuerligt men det är praktiskt svårt då billiga och enkla metoder saknas (Farooq & Siddique, 2017). Vanligt är att beslutsunderlaget istället grundas på metrologiska parametrar (Allen *et al.*, 1998; Chapman, 2019). För en så bra utförd bevattning som möjligt krävs kunskap om växtplatsen i form av jordart och rotdjup, nederbördsmonster, grödans vattenbehov och hur stort vattenunderskott grödan klarar av innan allvarlig stress uppkommer med skördenedsättningar som följd (Nangia *et al.*, 2018).

Ofta är bevattningsmöjligheterna begränsade, endera på grund av vattentillgångar eller kapacitet på bevattningsutrustning. Istället för full bevattning kan tillskottsbevattning användas. Strategin innebär att ge enstaka bevattningsgivor, till vanligtvis obevattnade grödor som producerar en viss mängd skörd även utan bevattning (Nangia *et al.*, 2018). Tillskottsbevattningen stabiliserar eller ökar skörden genom att säkra en tillräcklig vattenhalt i marken (Paulsen & Shroyer, 2004; Nangia *et al.*, 2018). Tillskottsbevattning har inte som mål att skapa stressfria förutsättningar under hela växtsäsongen utan att säkerställa en minsta mängd vatten vid de mest kritiska utvecklingsstadierna (Geerts *et al.*, 2010).

Bevattningsstrategin har både för- och nackdelar. En stor utmaning är svårigheten att bestämma tidpunkt för tillskottsbevattningen då långsiktiga nederbördsprognoserna kan vara osäkra (Farooq & Siddique, 2017). Samtidigt är strategin enkelt, effektivt och möjliggör mer stabila skördar. Tillskottsbevattning kan även, på grund av en högre skörd, bidra till att minska växthusgaserna genom ett ökat kolupptag i biomassan och kolinlagring i marken (Lal, 2004). En högre skörd med samma insatsvaror minskar även klimatavtrycket per producerad enhet (Nangia *et al.*, 2018).

## 2.2 Beräkningsmodell för markvattenmagasin

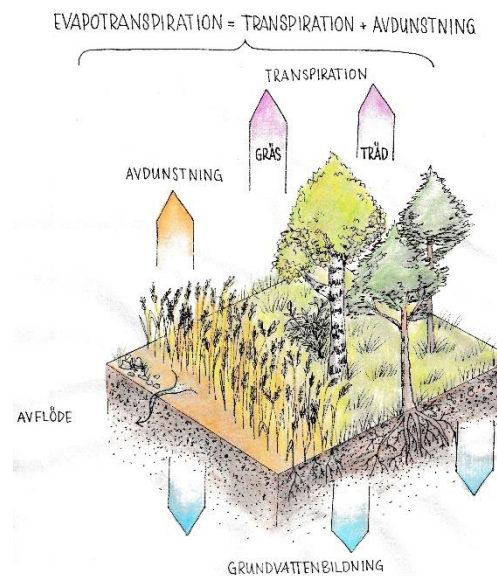
Beräkningsinstruktionerna för ET i FAO nr 56 kräver klimat- och markfysikaliska data. Klimatdatan för beräkning av potentiell evapotranspiration ( $ET_0$ ) behöver innehålla solinstrålning, vindhastighet, luftfuktighet samt lufttemperatur (Allen *et al.*, 1998). Saknas någon variabel kan uppskattningar göras i enlighet med FAO nr 56. Enligt (Allen *et al.*, 1998) ska vid otillräcklig data Hargreaves metod, som grundas endast på temperaturuppgifter, användas (Hargreaves & Samani, 1985). För att beräkna markvattenmagasinet krävs förutom ET, rotdjup och data om markens vattenhållande förmåga och markvattenhalten vid vegetationsperiodens start.

### 2.2.1 Evapotranspiration

ET är en kombination av två separata processer, evaporation då vatten avdunstar från markytan och transpiration då vattenånga avges från växten (figur 1) (Weidow, 1998). Evaporation och transpiration sker samtidigt från respektive yta. Evaporationen dominerar i de tidiga utvecklingsstadierna och transpirationen i resterande del av grödans utvecklingsfas (Emmerman *et al.*, 1990). Både evaporation och transpiration kräver energi för att förångna vattnet. Den primära källan är solstrålning, och

till viss del den omgivande temperaturen (Grip & Rodhe, 2009). Evaporation sker när det finns en gradient mellan ångtrycket vid markytan och den omgivande atmosfären. Evaporationen avtar då den omgivande luften är mättad (Grip & Rodhe, 2009). Förutom klimatiska faktorer påverkar skuggning av grödan, tillgängligt vatten i marken och intervallet mellan bevätningstillfällen evaporeringsprocessen (Allen *et al.*, 1998).

Transpiration är processen då vatten i växten avges till atmosfären, i huvudsak via växtens klyvöppningar (Weidow, 1998). Näst intill allt vatten som växten tar upp avges via transpiration och endast en liten del går åt till växtens uppbyggnad (Weidow, 1998; Shaozhong, Huanjie & Jianhua, 2000).



Figur 1. Schematisk bild över evaporation- och transpirationsprocesserna. Avdunstning motsvarar evaporationen från markytan och transpiration av vattenånga i huvudsak från växternas klyvöppningar. Illustration: Linnéa Sauer.

## 2.2.2 Vattenstress

När förutsättningarna för att ta upp vatten försämrats stressas växten. Stressen påverkas främst av (1) markens fysikaliska egenskaper såsom hydraulisk konduktivitet, fältkapacitet och vissningsgräns, (2) växtens utvecklingsstadium, (3) luftfuktighet och (4) markvattenmagasin (Lyra *et al.*, 2016).

### Markfysikaliska egenskaper

Mängden vatten i marken kan beskrivas som vattenhalt i volyms-%. Maximalt vatteninnehåll är när alla porer är vattenfyllda (Marshall & Holmes, 1988). Det kan också beskrivas med hjälp av bindningstrycket och marken är mättad då trycket i markvattnet är detsamma som atmosfärstrycket (Marshall & Holmes, 1988). Dessa kan korreleras till varandra om man vet jordens torra skrymdensitet. Vattnets bindningstryck uttrycks i meter vattenpelare och beskrivs i en bindningskaraktäristika, så kallad pF-kurva (Eriksson *et al.*, 2011). Bindningstrycket är lika med tyngden av en vattenpelare med höjden  $h$  och basen 1 cm (Eriksson *et al.*, 2011). pF är därmed logaritmen för höjden,  $h$  uttryckt i cm vattenpelare (Eriksson *et al.*, 2011). Från karaktäristikan kan porernas storleksfördelning urskiljas och kurvans derivata ger frekvensen av olika porstorlekar (bilaga I). De två viktigaste vattenhaltsparametrarna i



marken, fältkapacitet och vissningsgräns, kan utläsas i kurvan. Fältkapacitet definieras som markens vattenhalt som finns kvar när överskottsvattnet dränerats bort av gravitationskraften eller mängden vatten en dränerad jord kan hålla mot gravitationskraften vid en meters vattenpelare (pF 2,0) (Eriksson *et al.*, 2011). Den permanenta vissningsgränsen motsvarar 150 meter vattenpelare (pF 4,2) och är den fysikaliska gräns då växten inte längre kan extrahera något vatten (Eriksson *et al.*, 2011). Det växttillgängliga vattnet är skillnaden mellan fältkapacitet och den permanenta vissningsgränsen.

En blöt jord har lågt bindningstryck och vattnet kan enkelt tas upp av rötterna (Erpenbeck, 1982). Vattenupptaget reduceras innan vissningsgränsen och när minskningen av växttillgängligt vatten i rotzonen är större än det direkt växttillgängliga vattnet börjar växten uppleva vattenstress (Allen *et al.*, 1998). En torr jord har högt bindningstryck och det återstående vattnet är svårare att extrahera då det är starkt bundet till jordens matrix (Erpenbeck, 1982).

#### *Växtens utvecklingsstadie*

Det finns ingen konsensus i vilket utvecklingsstadie som spannmål är mest känsligt för vattenstress. Tidig stress reducerar växtens tillväxt och axantal (Paulsen & Shroyer, 2004; Passioura & Angus, 2010). Medelsen stress påverkar antalet kärnor medan sen stress påverkar kärnfyllnaden (Passioura & Angus, 2010; Oweis, 2014). Fischer (1979) ansåg att det viktigaste är en balans av vattentillgången före och efter blomning. Om balansen är ojämn och allt vatten är använt innan blomning och ingen nederbörd är väntad kan det resultera i en stor skördesänkning (Fischer, 1979).

Det som händer vid allvarlig stress är att klyvöppningarna stängs för att minska gasutbytet. Vid riktigt allvarlig stress ställer växten om från vegetativ till generativ tillväxt och brådmognad (Passioura & Angus, 2010). Samtidigt kan vete i viss mån acklimatisera sig till vattenstress (Steduto *et al.*, 2012). Vattenstressen är inte heller helt frikopplad från andra abiotiska och biotiska stressfaktorer, till exempel är en gröda med näringsbrist mer känslig för vattenbrist än grödor med god näringstillgång (Johansson & Linnér, 1977; Passioura & Angus, 2010).

#### *Luftfuktighet*

I fältförsök är det svårt att urskilja om vattenstress beror på hög temperatur eller låg luftfuktighet (Kumari & Rawson, 2012). Vid låg luftfuktighet och små markvattenmagasin stressas växten mer än om luftfuktigheten är hög. Luftfuktigheten påverkar vattenstressen främst genom att påverka vatteneffektiviteten genom att ändra mängden vatten som transpirerat per solinstrålning (Kumari & Rawson, 2012). Genom att påverka transpirationen påverkas hur fort och mycket, växten kommer att lida av vattenstress (Kumari & Rawson, 2012).

### *Rotzonen*

Rotzonens djup påverkar hur mycket vatten som finns tillgängligt för växtens rötter. Djupet styrs av ett flertal faktorer, däribland markens textur och struktur (Emmerman *et al.*, 1990). Hälften av rötterna finns i rotdjupets översta fjärdedel och den översta delen är därmed särskilt viktig. Detta leder till att då hälften av det växt-tillgängliga vattnet är förbrukat är matjorden nära vissningsgränsen (Emmerman *et al.*, 1990).

I vissa svenska experiment med spannmål skapade bevattning ett kraftigare och djupare rotsystem (Johansson & Linnér, 1977; Emmerman *et al.*, 1990). Framförallt på struktursvaga jordar ledde bevattning till bättre möjligheter för rötterna att växa på djupet och därigenom tillgodogöra sig mer av växtnäring och vatten i alven (Johansson & Linnér, 1977; Emmerman *et al.*, 1990). Samtidigt kan bevattning också leda till grundare rotsystem då växten främst tillgodogör sig lättillgängligt vatten (Klepper, 1991).

## 2.3 Mätmetoder för vattenhalten i marken

Mängden vatten i marken kan mätas i fält med direkta eller indirekta metoder. Med direkta mätmetoder vägs ett jordprov vägs före och efter torkning (IAEA, 2008) och utifrån detta kan den volymetriska vattenhalten beräknas. Med hjälp av jordprofilens djup kan man beräkna markvattenmagasinet (Erpenbeck, 1982). Direkta metoder är exakta och billiga men långsamma, tidskrävande och försvårar upprepningar (Muñoz-carpena, 2015).

Istället brukar indirekta metoder användas. Dessa uppskattar vattenhalten genom kalibrerade samband med andra mätbara variabler. Lämpligheten av varje metod beror på ett flertal faktorer såsom kostnader, noggrannhet, responstid, hållbarhet, installering samt erfarenheter och kunskaper hos användaren (Muñoz-carpena, 2015). Indirekta metoder klassificeras som volymetriska och bindningstrycksmetoder. En bindningstrycksmetod mäter hur hårt bundet vatten är i marken, ofta med en tensiometer eller matrixsensor. Volymetriska metoder ger vattenhalten i volymprocent (IAEA, 2008). Det är vanligt att uppskatta vattenhalten med volymetriska metoder med hjälp av dielektriska tekniker (IAEA, 2008). Genom att mäta jordens permittivitet, vilket är förmågan att påverka ett elektriskt fält kan vattenhalten uppskattas (Muñoz-carpena, 2015). Jordens permittivitet utgörs av det relativa innehållet av varje beståndsdel i jorden såsom mineraler, luft och vatten. Då den dielektriska permittiviteten för flytande vatten är mycket högre än jordens andra beståndsdelar, styrs den totala permittiviteten till största del av mängden flytande vatten (Muñoz-carpena, 2015). Metoden fungerar för de flesta mineraljordar oberoende

av textur. För vattenhalter över 50 % och organiska jordar krävs en specifik kalibrering (Muñoz-carpena, 2015).

Grödor extraherar vatten efter mängd rötter per jordvolym. Då den största rot-densiteten är i matjorden torkar de övre skikten ut först. Mängden vatten i profilen varierar med rotdjupet och därför ska vattenhalten mätas på flera djup i rotzonen (IAEA, 2008). Vid sensormätningar är noggrannhet och precision viktigt för att få användbara värden av vatteninnehållet. Vid upprepade mätningar ska standardavvikelsen vara så låg som möjligt samt mätvärdet så nära det verkliga värdet (IAEA, 2008). Mätningar av markvattenhalten kan vara väldigt kostsamt och tidskrävande samtidigt som användbarheten av observationsdata är begränsad på grund av dess temporära och rumsliga variation (Jong & Bootsma, 1996).

## 2.4 Skörderespons i relation till vatten

Vete är en av världens vanligaste grödor och förutsättningarna i västra Europa är mycket gynnsamma för veteproduktion (Paulsen & Shroyer, 2004). Måttlig temperatur och hög nederbörd skapar goda förutsättningar för höga skördar. Samtidigt kan bevattning leda upp till 25 % skördeökning i västra Europa (Zhao *et al.*, 2013). Svenska uppskattningar tyder på att tillskottsbevattning i spannmål kan leda till en 20 % skördeökning (Wesström & Joel, 2014).

### 2.4.1 Durumvete

I fältförsök L1-266 odlades durumvete vilket är en ovanlig variant av vete i Sverige. 10–20 % av Sveriges årliga veteareal består av vårvete och endast en mycket liten del av detta utgörs av durumvete (*Triticum durum*) (Jordbruksverket, 2019). Durumvete utgör runt 8 % av världens totala veteproduktion (Paulsen & Shroyer, 2004). Durumvete sås på våren, är mer stresstålig än vanligt vete (*Triticum aestivum*) och odlas framförallt i regioner med betydande abiotisk stress såsom torka och höga temperaturer (Paulsen & Shroyer, 2004). Durumkärnorna är större än hos vanliga vetesorter, väldigt hårda och har en hög halt av glutenprotein (Kadkol & Sissons, 2016). Odling av durumvete ger ofta större avkastning än andra vetesorter i områden med låg nederbörd, men lägre skörd vid lågt pH i marken (Kadkol & Sissons, 2016). Durumveteplantorna är högre än vårvete och under perioder med hög nederbörd drabbas durumvete oftare av liggsädd (Kadkol & Sissons, 2016). På grund av ovanstående faktorer och en ökad efterfrågan av durumvete odlas det numera på Gotland (Gianuzzi, 2017).

#### 2.4.2 Tidigare bevattningsstudier på spannmål

ICARDA, International Center for Agricultural Research in the Dry Areas har i försök med tillskottsbevattning visat på påtagliga skördeökningar i relation till vattenanvändningen i områden med både relativt mycket och lite nederbörd (Oweis, 2014).

Oweis (2014) visar på en skördeökning för vete både vid torra (234 mm nederbörd) och blöta (504 mm nederbörd) år. Skörden vid blöta år utan bevattning var 5000 kg ha<sup>-1</sup> och med tillskottsbevattning 6440 kg ha<sup>-1</sup>, en ökning med 29 %. Trots variationer i årstider och odlingsstrategier är nederbörd och skördenivåer inte så långt ifrån svenska förhållanden. Säsongen 1997/98 var nederbörden 236 mm på ett fältförsök hos ICARDA, Irak. Utan bevattning var veteskörden 2160 kg ha<sup>-1</sup> men genom 68 mm tillskottsbevattning på våren ökade skörden till 4620 kg ha<sup>-1</sup> (Oweis, 2014). För att erhålla en god effekt av tillskottsbevattning krävs att andra essentiella behov såsom näringstillgång är godtagbara. Näringsbrist är en vanlig växthämmande orsak och en förbättrad gödsling leder i stora delar av världen till en bättre skörd (Oweis, 2014; Chapman, 2019). En brist på framförallt kväve leder därmed till både lägre skörd och sämre vattneffektivitet (Oweis, 2014; Chapman, 2019).

För att kunna göra jämförelser mellan vattenanvändningen och dess effektivitet mellan olika platser krävs nyckeltal. Internationellt används ofta vattneffektivitet, WUE, som motsvarar skörd per enhet av anpassad evapotranspiration,  $ET_c$  adj (Zhang & Oweis, 1999; Sadras & Angus, 2006; Sun *et al.*, 2006; Boutraa *et al.*, 2010). Med avseende på begränsade vattenresurser måste WUE öka. Vete har jämfört med många grödor en hög WUE (Paulsen & Shroyer, 2004; Sadras & Angus, 2006; Steduto *et al.*, 2012). Vanligtvis brukar 10-12 kg kärnskörd per mm ET användas som riktmärke (Paulsen & Shroyer, 2004). Det innebär att svenskt vete med en medelskörd på 6000 kg per hektar kräver omkring 400 mm vatten per säsong. Under den totala växtsäsongen (sådd till skörd) har veteodlingar vanligtvis en kumulativ ET på 200-500 mm, men i halvtorra regioner kan den vara ännu lägre och i regnrika eller fullt bevattnade odlingar kan ET vara över 800 mm (Steduto *et al.*, 2012). I Sverige, där viss nederbörd kan förväntas är merskörd, skördeökning per mm tillsatt bevattning ett bättre nyckeltal. Nederbörden kommer att variera mellan åren, och genom att studera merskörden underlättas den ekonomiska kalkyl som ska göras innan eventuell spannmålsbevattning introduceras.

På 70 och 80-talet utfördes flera bevattningsförsök med olika grödor och på olika platser i Sverige. Johansson & Linnér, (1977) gjorde en sammanställning efter jordart över försöken med bevattning av (tabell 1). Tabell 1 visar på den merskörd en respektive två bevattningsgivor gav upphov till. Alla led i försöken hade full tillgång på näring och bevattning har endast skett då behov ansetts föreligga, därmed har framförallt den andra bevattningen ibland uteblivit (Johansson & Linnér, 1977).

Linnér gjorde även en sammanställning 1986 som visade på ännu större merskördar, upp till 40 %. Sammanställningen bestod dock av färre försök (Linnér, 1986).

Nya resultat med högavkastande sorter är få men 2008-2010 utfördes ett fältförsök med bevattning av korn på en lerig sand och den genomsnittliga skördeökningen var då 1550 kg per hektar och upp till 64 % skördeökningar (Mattson, 2009, 2010; Hansson, 2012).

Tabell 1. Medelskörd i bevattningsförsök i korn 1972–1975. Tabell efter Linnér och Johanssons sammanställning 1977

	Antal försök	Skörd obv. kg ha <sup>-1</sup>	Merskörd 1 bev. kg ha <sup>-1</sup>	Merskörd 2 bev. kg ha <sup>-1</sup>
<i>Sand- och grovmojordar</i>				
Försök med 1 bev	10	2770	430	-
Försök med 1 och 2 bev	9	2430	430	1120
<i>Finmo- och mjälajordar</i>				
Försök med 1 bev	4	4630	390	-
Försök med 1 och 2 bev	3	3970	420	540
<i>Lättleror och lättare mellanleror</i>				
Försök med 1 bev	10	3980	730	-
Försök med 1 och 2 bev	8	3740	760	1110
<i>Styvare mellanleror och styva leror</i>				
Försök med 1 bev	19	4180	420	-
Försök med 1 och 2 bev	12	3910	570	870

Effekten av bevattning beror till stor del på jordart. Lätta jordar som bevattnats i otillräcklig mängd kan visa upp en sänkt kärnskörd. I Johansson och Linnér's sammanställning syns enstaka år att på kapillärjordar har en bevattning minskat skörden med 80 kg medan två bevattningar gett en merskörd på 900 kg per hektar. En tredje bevattning efter axgång gav en merskörd på 1310 kg per hektar. Utifrån de försöken visas att om ett bevattningsbehov föreligger på kapillärjordar kan endast en bevattning av stråsäd minska skörden medan två eller flera leda till en skördeökning. Lättleror och lättare mellanleror svarade bra på endast en bevattning (Johansson & Linnér, 1977).

Betingelserna för vegetativ tillväxt är bäst när markens vatteninnehåll är nära fältkapacitet (Johansson & Linnér, 1977). Detta kan praktiskt vara svårt och därför finns generella rekommendationer om att bevattna när hälften till en tredjedel av det växttillgängliga vattnet återstår (Johansson & Linnér, 1977). Enligt Paulsen och Shroyer (2004) och Raes *et al.* (2006) rekommenderas att vete bevattnas när hälften av det växttillgängliga vattnet är förbrukat.

### 3 Metod och material

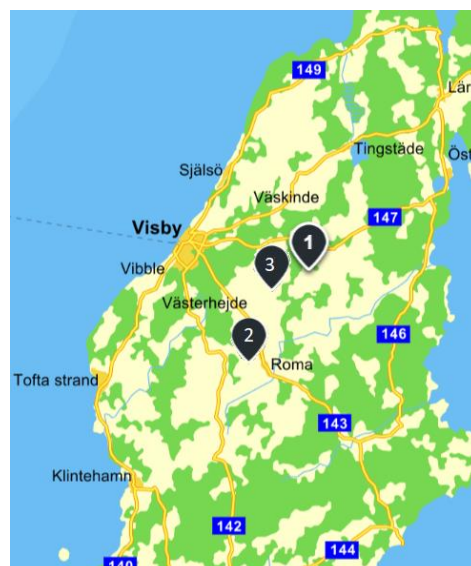
Nedan presenteras uppsatsens metoder. Först presenteras SLU:s fältförsök L1-266 "Tillskottsbevattning till spannmål" följt av den använda beräkningsmodellen för markvattenmagasinet. Därefter förklaras mätningarna av markvattenhalterna i fält samt skördesammanställningen.

Relevanta publikationer till uppsatsen söktes med hjälp av SLU-bibliotekets databaser och dess tryckta litteratur. Svensk litteratur användes då sådan fanns tillgänglig. Svenska publikationer är överlag flera decennier gammal då få nya studier har gjorts inom bevattningsområdet.

### 3.1 Beskrivning av fältförsök L1-266

Fältförsöket var utlagt på tre olika platser; Ekeby (Gotland), Torslunda (Öland) och Skepparslöv (Kristianstad) under växtsäsongerna 2017, 2018 och 2019. Fokus i den här uppsatsen är fältförsök L1-266 i Ekeby, Gotland där durumvete av sorten Rosadur odlades. Ekeby är lokaliserat 17 km öster om Visby (figur 12).

Gotland har maritimt klimat med relativt milda vintrar och svala vårar. Den årliga nederbörden är drygt 500 mm och 30-årsmedelvärdet (1961–1991) för nederbörd under odlingssäsongen (maj–augusti) är 159 mm (Persson *et al.*, 2015). Nederbördsunderskottet är under samma period ofta 200 mm. Medeltemperaturen



**Figur 2.** Karta över försök L1-266 lokalisering på Gotland. 1. Försökets lokalisering, Ekeby Smide. 2. Jordprovernas lokalisering, Hakuse. 3 Lantmets väderstation, Hallfreda.

för Gotland är 9° (maj), 14° (juni), 16° (juli) och 16° (augusti). Vegetationsperioden är i medeltal 211 dagar (1961–1990) och startar i mitten på maj (Persson *et al.*, 2015). Jordarten på platsen är en måttligt mulhaltig molåttlera med 20 % ler, 30 % silt, och 45 % sand.

Fältförsöket bestod av ett randomiserat blockdesign försök med fyra olika behandlingar i fyra block. Följande fyra behandlingar ingick i försöket;

- Obevattnat;
- Optimal bevattning, bevattning utfördes då cirka 40 % av det totalt växttillgängliga vattnet var förbrukat. Bevattningen styrdes med hjälp av vattenbalansberäkningar och gradering av grödans utvecklingsstadie;
- Tidig bevattning, 1–3 gånger vid dålig uppkomst (mindre än 50 %), annars från bestockning till stråskjutning;
- Sen bevattning, 1–3 gånger från axgång till degmognad.

Bevattningsmängden varierade mellan 25–31 mm per gång. Förutom bevattning var alla övriga odlingsåtgärder såsom jordbearbetning, gödsling, och bekämpning likadant utfört på alla behandlingar, se gödslingsmängder i tabell 2.

Tabell 2. Sammanställning av såtidpunkter, gödslingsmängder samt skördedatum för respektive år

	Sådd	Förfrukt	Gödsling	Mängd (kg ha <sup>-1</sup> )	Tidpunkt för gödsling	Skörd
2017	2017-04-07	Höstraps	NPK 21-3-10 NS 27-4 KS	529 200 650	2017-04-07 2017-06-03 2017-06-21	2017-08-29
2018	2018-04-18	Höstråg	NPK 21-3-10 NPK 26-3-4 NS 27-4	595 240 185	2018-04-18 2018-05-20 2018-06-13	2018-08-07
2019	2019-04-08	Durumvete	NPK 21-3-10 NPK 27-3-3 Norotec spannmål Mn 235	600 200 1 (l/ha) 2,9 (l/ha)	2019-04-08 2019-05-22 2019-05-22 2019-06-18	2019-08-21

Försöket bevattnades med hjälp av en bevattningsramp. Effektiviteten vid rampbevattning är omkring 85–90 % och högre än vid användning av storspridare (Chapman, 2019). Energibehovet är lägre och spridningen blir jämnare, framförallt vid vindhastigheter över 5 m s<sup>-1</sup> (Emmerman *et al.*, 1990).

## 3.2 Beräkningsmodell för markens vattenhalt

FAO Irrigation and drainage rapport nr. 56 innehåller utförliga riktlinjer för beräkning av ET och markvattenmagasin. Potentiell evapotranspiration,  $ET_o$ , är en beräknad evapotranspiration för en standardiserad gröda utan stresspåverkan. Den anpassade evapotranspirationen,  $ET_{c\ adj}$ , tar hänsyn till grödegenskaper och stressfaktorer.

### 3.2.1 Evapotranspiration

Sedan 1990 är FAO Penman-Montheith (PM) standardmetod för att beräkna ET (Allen *et al.*, 1998). Den är mest tillförlitlig då den baseras både på fysikaliska processer och grödans egenskaper (Rana, Katerji & Mastrorilli, 1997; Gassmann, Gardiol & Serio, 2011).

För att beräkna  $ET_o$  användes uppmätt klimatdata från LantMets väderstation Hallfreda, 9 km från försöksplatsen (LantMet, 2019). Beräkningar utfördes i Mathlab enligt följande:

$$ET_o = \frac{0,408s(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2(e_s - e_a)}{s + \gamma(1 + 0,34u_s)} \quad (1.)$$

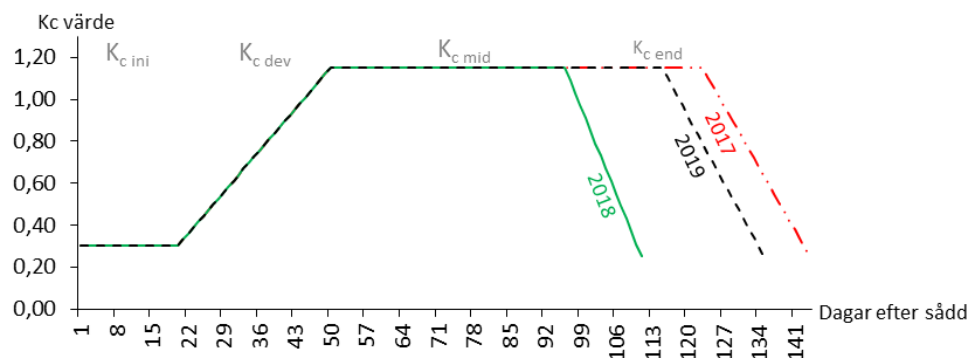
Där  $R_n$  är daglig solinstrålning ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ );  $G$  markvärmeflödestäthet ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ );  $T_m$  daglig medeltemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) 2 meter över markytan;  $u_2$  medelvindhastigheten 2 meter över markytan ( $\text{m s}^{-1}$ );  $e_s$  mättat ångtryck (kPa);  $e_a$  det faktiska ångtrycket;  $\gamma$  psykrometrisk konstant ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ); och  $s$  riktningskoefficienten för kurvan som visar förhållandet mellan mättat ångtryck och temperatur ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Resterande data behandlades och analyserades i Excel. Förutom klimatiska variabler påverkar grödspecifika egenskaper ET, vilket brukar betecknas  $ET_c$ . För att erhålla  $ET_c$ , multipliceras den grödspecifika faktorn  $K_c$  med  $ET_o$ .

$$ET_c = ET_o K_c \quad (2.)$$

$K_c$  beräknas endera med en enkel eller dubbel grödkoefficient och här beskrivs den enkla. Den enkla grödkoefficienten kombinerar evaporation och transpiration, är dimensionslös och representerar den specifika grödans egenskaper (Allen *et al.*, 1998). Den används främst till planering av bevattningsprojekt samt vid ett mindre antal bevätningstillfällen (Garcia *m.fl.*, 2003; Kang *m.fl.*, 2003). Då bevätningstillfällena är relativt få, framförallt i början på säsongen används i den här uppsatsen den enkla grödkoefficienten. På grund av förändring i höjd, bladyteförändringar och marktäckning varierar  $K_c$  över odlingssäsongen och delas vanligen upp i fyra steg, se figur 3 och tabell 3.





Figur 3. Beräknade  $K_c$ -värden över växtsäsongerna 2017, 2018 och 2019 och representeras av röd, grön respektive svart kurva.  $K_{c\ ini}$  motsvaras av initialfasen,  $K_{c\ dev}$  av utvecklingsfasen,  $K_{c\ mid}$  av kärnfyllnadsfasen och  $K_{c\ end}$  av avmognadsfasen.

Tabell 3. Utvecklingsstadiernas längd, initial (ini), utveckling (dev), kärnfyllnad (mid) och avmognad (end) för åren 2017 till 2019. FAO:s generella rekommendationer över utvecklingsstadiernas längd visas i kolumnen längst till vänster. Standardiserade  $K_c$  värden visas i kolumnen längst till höger

Utvecklingsstadium (dagar)	FAO	2017	2018	2019	FAO $K_c$
Initial (ini)	20	20	20	20	0,3
Utveckling (dev)	25	30	30	30	
Kärnfyllnad (mid)	60	73	46	65	1,15
Avmognad (end)	30	21	15	20	0,25
Totalt antal dagar:	135	144	111	135	

Bestämning av de fyra utvecklingsstadiernas längd gjordes med hjälp av rekommendationer i enlighet med FAO nr 56 (Allen *et al.*, 1998) men justerades efter observationer i fält med hjälp av antecknade utvecklingsstadier. 2018 års växtsäsong (från sådd till skörd) var 33 dagar kortare än 2017 och det var framförallt  $K_{c\ mid}$  (kärnfyllnad) som var kortare. Värdet av faktorn  $K_{c\ ini}$  (initial) bestämdes till 0,3 i enlighet med tabell 12 i FAO nr 56. Det var få dagar av nederbörd, om dagarna med nederbörd vore fler skulle  $K_{c\ ini}$  korrigeras i enlighet med Annex 6 i samma rapport.  $K_{c\ dev}$  (utveckling) interpolerades mellan ini och mid-värdena och kan läsas ut i  $K_c$ -kurvan (figur 3).  $K_{c\ mid}$  och  $K_{c\ end}$  (avmognad) bestämdes vardera till 1,15 respektive 0,25. Rotdjupet bestämdes till 20 cm de 10 första dagarna och därefter med en kontinuerlig tillväxt på 1,5 cm per dag tills de nått det fullständiga rotdjupet på 0,7 m. Rotdjupet varierade inte mellan behandlingarna utan är satt till 0,7 m i alla behandlingar.

$ET_c$  hänvisar till standardförutsättningar utan något stressmoment. Om det råder någon typ av stress såsom vattenbrist, sjukdomar, för hög salthalt, brist på näringsämnen, vattenmättnad i jorden eller ogenomträngliga horisonter kan det leda till en

lägre ET och minskad grödtillväxt som kräver en justering av  $ET_c$  (Allen *et al.*, 1998). Detta förklaras vidare under avsnitt 3.2.3.

### 3.2.2 Markdata

Fältförsök L1-266 utfördes på en lättlera. Fältdata från Hakuse, Gotland, med liknande jordprofil användes för att få fram representativa jordegenskaper då försöksplatsens data ej var färdiganalyserad. Jorden i Hakuse bestod av 11,6 % ler, 42,6 % silt och 45,5 % sand. Båda jordarna innehöll mycket sand och hade en liknande kornstorleksfördelning i jordprofilens olika skikt. Mullhalten var högre på försöksplatsen än i Hakuse.

Tabell 4. *Textur och jordart i Hakuse respektive den faktiska försöksplatsen. Jordarten enligt den internationella klassificeringen står inom parantes*

	Ler (%)	Silt (%)	Sand (%)	Mullhalt (%)	Jordart
Hakuse	13	42	43	2,5	Något mullhaltig lerig mo
Faktiska försöksplatsen	20	30	45	3,9	Måttligt mullhaltig molättlera

Med hjälp av pF-kurvor för respektive jordskikt bestämdes fältkapacitet, vissningsgräns och växttillgängligt vatten, se tabell 4. Uppritad pF-kurva finns i bilaga I.

Tabell 5. *Bindningstrycket  $h_t$  uttrycks i meter vattenpelare och är differensen mellan grundvattennivån och det aktuella skiktdjup. vattenhalten vid dräneringsjämvikt ( $\theta_{dr 1,0}$ ) vid grundvattenytan 1 m (fältkapacitet). Vissningsgränsen motsvaras av  $V_{t,150}$  och fältkapaciteten av den totala vattenhalten i profilen (195,4mm)*

Horisontdjup (cm)	$h_t$ i m vp (grundvattenytan 1 m)	$\theta_{dr 1,0}$ (vol-%)	Vissningsgräns (mm)	Växttillgängligt vatten (mm)
0–10	0,95	34,7	13,2	21,5
10–20	0,85	33,8	12,4	21,4
20–30	0,75	33,8	12,4	21,4
30–40	0,65	25,8	11,5	14,3
40–50	0,55	22,5	10,9	11,6
50–60	0,45	22,8	9,4	13,4
60–70	0,35	22	7,3	14,7
<i>summa:</i>		195,4	76,7	118,3

Totalt tillgängligt vatten, TAW (mm), i rotzonen är skillnaden mellan fältkapacitet och vissningsgräns multiplicerat med rot djupet  $Z_r$ . Det växttillgängliga vattnet utläses i tabell 5.

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r \quad (3.)$$

Direkt tillgängligt vatten, RAW, erhålls genom att multiplicera TAW med faktorn (p) av TAW som är direkt växttillgängligt innan grödan upplever stress. p är gröd-specifikt och varierar inte per dag utan bestäms i enlighet med riktlinjer i FAO nr 56 tabell 22 vilket gör att 0,55 har använts i denna studie.

$$RAW = p * TAW \quad (4.)$$

### 3.2.3 Stressfaktor

Om det råder någon typ av stress erhålls den anpassade evapotranspirationen (eng. *adjusted evapotranspiration*)  $ET_{c \text{ adj}}$ , genom att multiplicera  $ET_c$  med en stressfaktor,  $K_s$ .

$$ET_{c \text{ adj}} = K_s ET_c \quad (5.)$$

$K_s$  varierar mellan 0,075–1, där 1 motsvarar stressfria förutsättningar (Allen *m.fl.*, 1998; Ferreira *m.fl.*, 2012). Det finns inte en beräkningsmodell som är allmänt accepterad (Ferreira *et al.*, 2012) men här beskrivs FAO nr 56 föreslagna beräkningar för  $K_s$ .  $K_s$  beräknas enligt:

$$K_s = \frac{TAW - D_{r,i}}{TAW - RAW} \quad (6.)$$

För att uppskatta  $K_s$  krävs en daglig vattenbalans för rotzonen. Den dagliga vattenbalansen uttrycks i förbrukningen av markvattenmagasinet  $D_{r,i}$  (mm) i slutet av dagen.

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (7.)$$

$D_{r,i-1}$ , bestämdes i beräkningsmodellen vid sådd till fältkapacitet (0 mm) dvs fullt växttillgängligt markvattenmagasin och vattenbalansens ingående variabler är  $ET_c$  (mm),  $P$  = nederbörd (mm),  $RO$  = avrinning (mm),  $I$  = bevattning (mm),  $CR$  = kapillär upptransport och  $DP$  = perkolation (mm). Modellen utgår från att ingen  $RO$ ,  $CR$  och  $DP$  skett under växtsäsongen.

I jämförelsen mellan beräkningarna och mätningarna av markvattenmagasinet utgår beräkningarna från att första mätningen är korrekt.

### 3.3 Markvattenhaltsmätningar

Den volumetriska vattenhalten uppmättes i fältförsöket med hjälp av DeltaT PR6 Profile Probe. Mätsensorn mäter markfuktigheten på sex olika djup (10, 20, 30, 40, 60 och 100 cm) med hjälp av sex separata sensorringar (Devices, 2016). Sensorerna mäter det elektromagnetiska fältet omkring varje ring och därmed vattenhalten på olika djup i jordprofilen (Devices, 2016).

I fältförsöket användes sonden som en portabel utrustning kopplad till en handburen mätare som direkt visar och sparar mätvärdena. Ett flertal åtkomströr installerades för att möjliggöra mätning i alla rutor i försöket. Data sparades i HH2-metern och uppladdades för dataanalys.

Mätningarna genomfördes 14 gånger (2017), 9 gånger (2018) och 10 gånger (2019), se figur 6. Åren 2017 och 2018 upprepades mätningen tre gånger i samma åtkomströr varav ett medelvärde för respektive djup beräknades. Respektive behandlings vattenhalt erhöles genom ett medelvärde av de fyra blocken. År 2019 fick rutorna i block III fel behandling och därmed är block III borttaget detta år. Samma år gick inte åtkomströren ned till en meters djup och mätvärdena korrigerades efter det faktiska djupet.



Figur 4. Delta T profile probe utrustning med sensorer på 10, 20, 30, 40, 60 och 100 cm djup.

Sådatum		Skörd
2019-04-08	49* 56* 64* 70* 78* 84* 91* 98* 105* 114*	2019-08-21 Dag 135
2018-04-18	36* 41* 51* 58* 70* 78* 83* 92* 99*	2018-08-07 Dag 111
2017-04-07	26* 33* 35* 42* 49* 53* 62* 69* 77* 83* 98* 108* 116* 124*	2017-08-29 Dag 144

Figur 5. Schematisk bild över tidpunkterna av markvattensmätningarna. Antal mätningar samt datum varierade mellan åren. Siffrorna motsvarar antal dagar efter sådd.

### 3.4 Skördedata

Skördedata för respektive år analyserades separat och statistisk analys genomfördes i statistikprogrammet Minitab (version 18). Fältförsök L1-266 är ett randomiserat block design försök vilket innebär att skillnaden inom blocken ska vara så liten som möjligt så att behandlingar ska få samma platsspecifika förutsättningar inom respektive block. En variansanalys med två förklarande faktorer (behandling och block)

genomfördes. Med hjälp av Tukey's test för parvisa jämförelser analyserades vilka behandlingar som skilde sig statistiskt från de andra.

## 4 Resultat

Daglig  $ET_o$  varierade mellan 0,9 och 6,7 mm under de tre försöksåren på Gotland med generellt lägre värden i början av växtsäsongerna.

Normal nederbörd under odlingssäsongen (maj–augusti) är 159 mm (långtids-medelvärde 1961–1991) (Persson *et al.*, 2015). Det kan jämföras med 2017 års 119 mm och 2018 års 108 mm. 2018 kom dock endast 44 mm mellan sådd och skörd och präglades starkt av torkan. På grund av sen sådd, brådmognad och således tidig skörd blev växtsäsongen 2018 en månad kortare än normalt. 2019 års nederbörd var 146 mm maj–augusti.

Vetets utvecklingsstadie har graderats i olika omfattning. År 2017 finns tre graderingar registrerade, 2018 ingen gradering och 2019 10 graderingar. Därmed kan dessa inte sättas i relation till bevattningen för att på ett jämförbart sätt studera de respektive åren.

### 4.1 Beräkningsmodell för evapotranspiration och markvattenmagasin

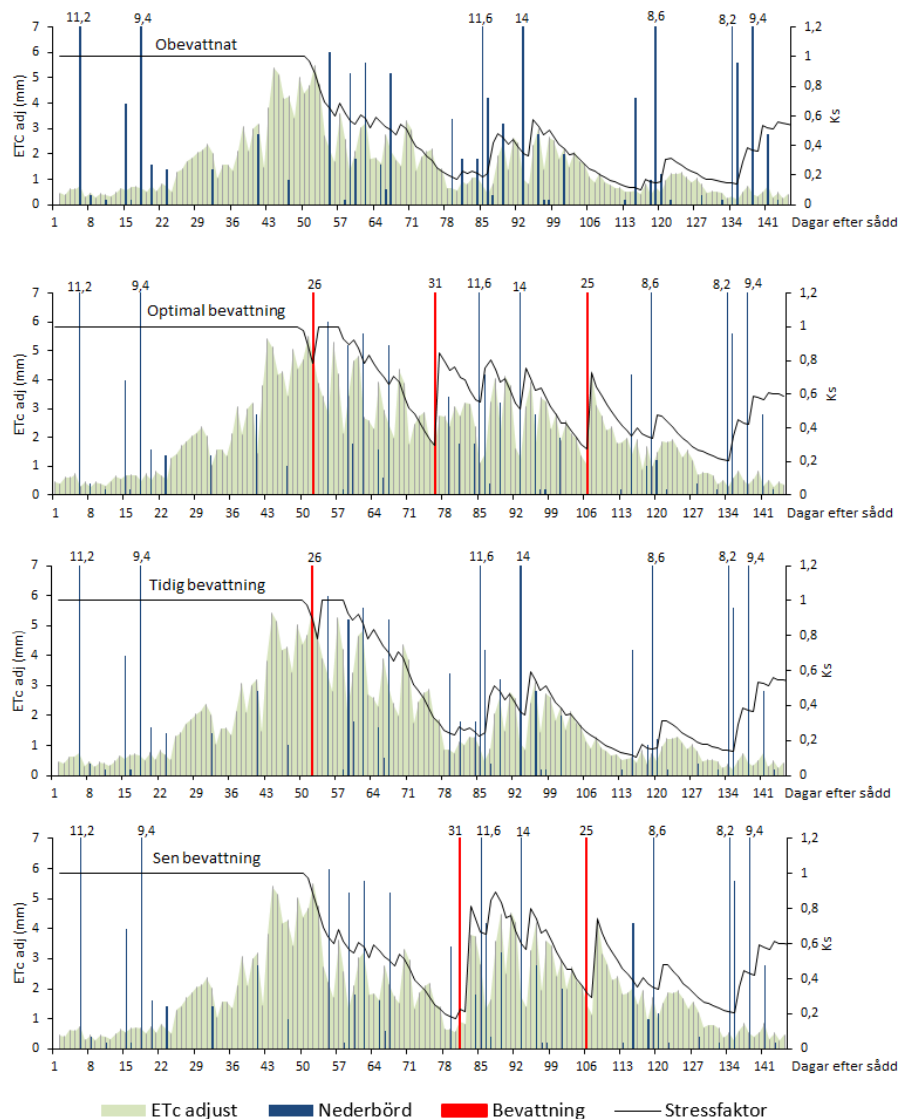
Nederbörd,  $ET$ , bevattningsmängder och stressfaktor illustreras i figurerna 6, 7 och 8 för respektive år och behandling. Total  $ET_{c\ adj}$  visas under respektive år.

#### 4.1.1 2017

I figur 6 visas beräknad  $ET_{c\ adj}$ . Försöket såddes den 7 april och det kom tillfredställande mycket regn efter sådd. Figuren visar att första bevattningstillfället var dag 52. Hälften av det växttillgängliga vattnet i det obevattnade och sent bevattnade leden var förbrukat 50 dagar efter sådd (26 maj). Dag 52, då grödan började bli stressad, bevattnades det optimala och tidiga ledet med 26 mm vilket gjorde att det dröjde ytterligare 8 dagar innan grödan upplevde någon stress. Därefter rådde viss stress resterande del av växtsäsongen men stressfaktorn var aldrig under 0,3 och särskilt

påtaglig. Det sent bevattnade ledet bevattnades dag 86 och 106 och därefter rådde ingen påtaglig stress.

2017 var grödans kumulativa  $ET_c$  458 mm. Stressfaktorn påverkar  $ET_{c\text{ adj}}$  i stor utsträckning och halverade  $ET_{c\text{ adj}}$  i det obevattnade ledet till 221 mm.  $ET_{c\text{ adj}}$  var i respektive led 300 mm (optimal), 247 mm (tidig) och 274 mm (sen).



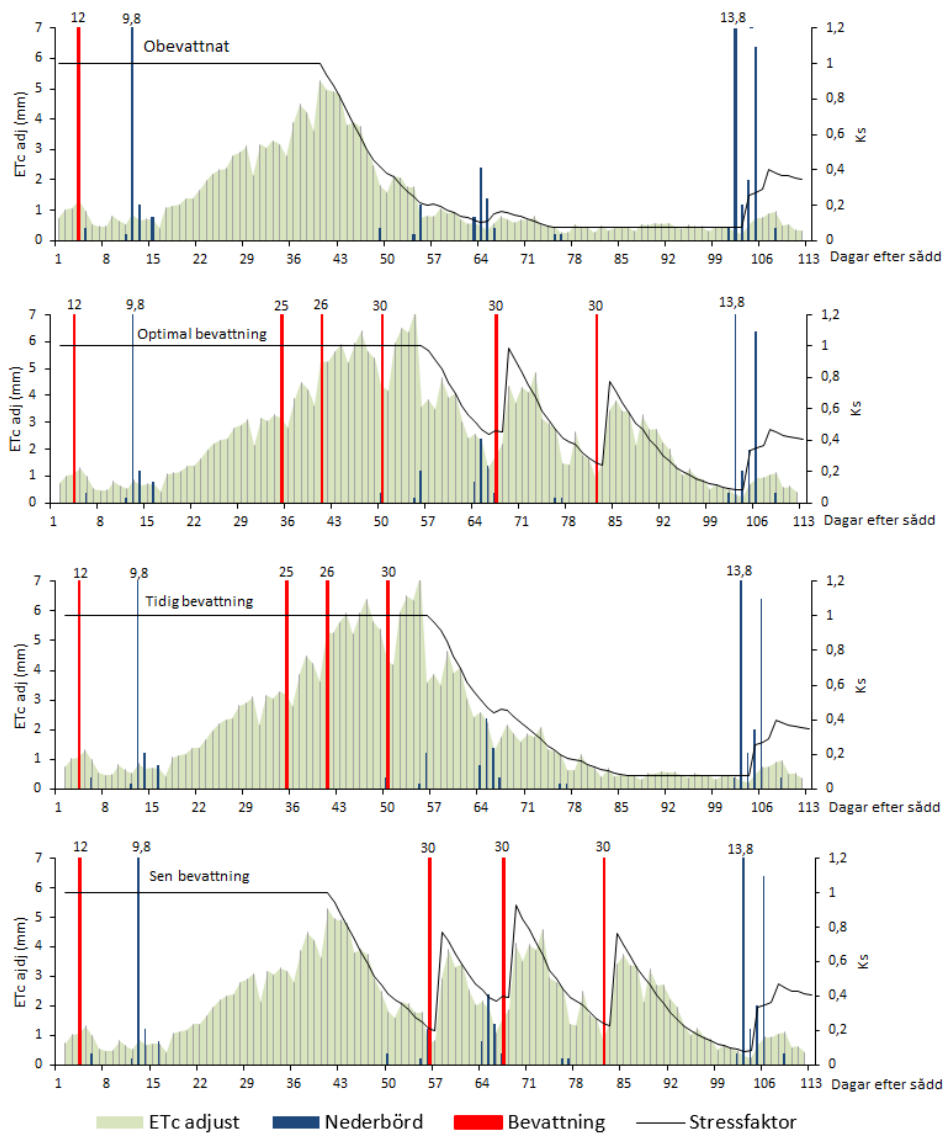
Figur 6. Beräknad anpassad evapotranspiration,  $ET_{c\text{ adj}}$  i respektive led för växtsäsongen 2017. Staplar motsvarar nederbörd och bevattning i mm och värden högre än 7 mm visas ovanför respektive stapel. Beräkningar utgår från fältkapacitet vid sådd. Stressfaktorn, till höger, varierar inom intervallet 0,075–1.

#### 4.1.2 2018

År 2018 var ett väldigt torrt år vilket hade stor påverkan på hela växtodlingssäsongen. Försöket såddes den 18 april och för att få igång tillväxten bevattnades alla led med 12 mm efter sådd.

Figur 7 visar att i det tidigt bevattnade ledet påverkades grödan av stress efter sista bevattningen. I det optimalt bevattnade ledet återhämtade sig grödan något efter varje bevattning. I det sent bevattnade ledet varierade stressen med viss återhämtning efter varje bevattning. 2018 påverkade stressfaktorn ET i stor utsträckning.  $ET_c$  var 429 mm men vid hänsyn till stressfaktorn minskade ET med 3 gånger i det obevattnade ledet.  $ET_{c\ adj}$  var i respektive led 150 mm (obevattnat), 281 mm (optimal), 228 (tidig) och 230 mm (sen).





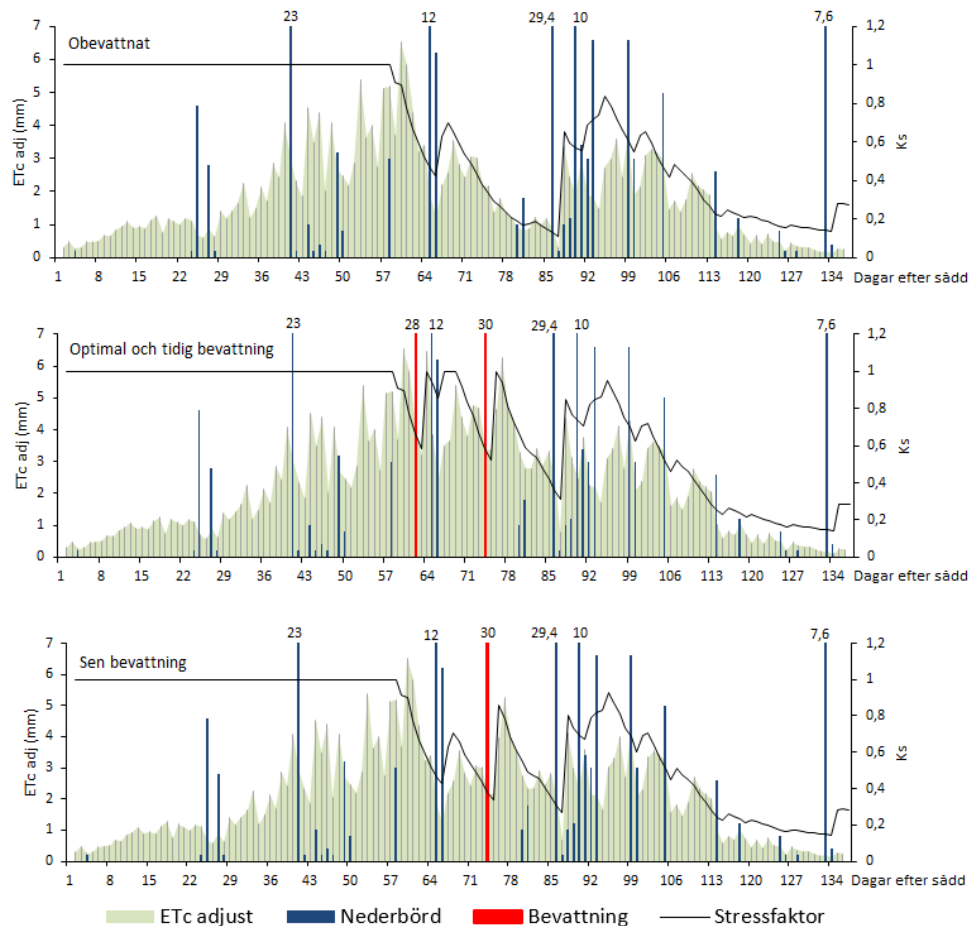
Figur 7. Beräknad anpassad evapotranspiration,  $ET_{c\text{ adj}}$ , i respektive led för växtsäsongen 2018. Staplar motsvarar nederbörd och bevattning i mm och värden högre än 7 mm visas ovanför respektive stapel. Beräkningar utgår från fältkapacitet vid sådd. Alla led gavs 12 mm bevattning efter sådd för att få igång tillväxten. Stressfaktorn, till höger, varierar inom intervallet 0,075–1.

#### 4.1.3 2019

2019 gav bättre odlingsförutsättningar än föregående år trots lite regn efter sådd (figur 8). Det optimala och tidigt bevattnade ledet fick samma behandling, bevattning dag 62 och 74. Det sent bevattnade ledet fick en bevattningsgiva dag 74. Dag 86 kom nederbörd i storleksordning som en bevattning. I slutet av växtsäsongen

rådde stressförhållanden i alla led men så pass sent att ingen bevattning var motiverad.

2019 var  $ET_c$  436 mm. Stressfaktorn påverkade ET i mindre utsträckning än de tidigare åren och  $ET_{c\text{ adj}}$  var 247 mm (obevattnat), 305 mm (optimal och tidig) och 277 mm (sen).



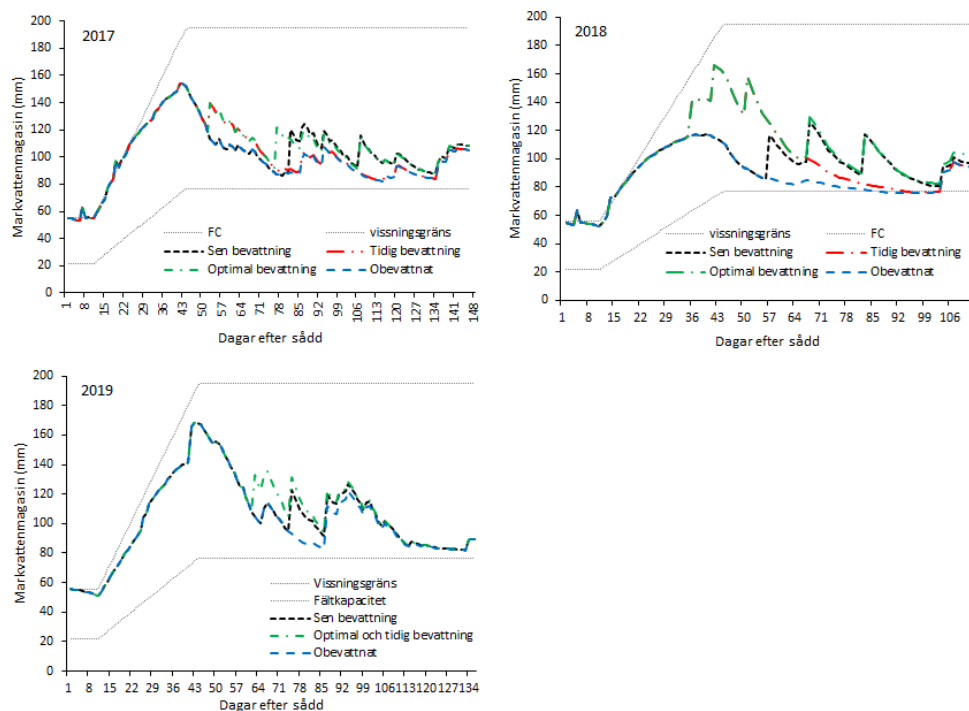
Figur 8. Beräknad anpassad evapotranspiration  $ET_{c\text{ adj}}$  i respektive led för växtsäsongen 2019. Staplar motsvarar nederbörd och bevattning i mm och värden högre än 7 mm visas ovanför respektive stapel. Beräkningar utgår från fältkapacitet vid sådd. Stressfaktorn, till höger, varierar inom intervallet 0,075–1.

#### 4.1.4 Beräknade markvattenmagasin

Figur 9 visar de beräknade markvattenmagasinen grundat på data presenterad i figurerna 6 till 8. Figurerna utgår från fältkapacitet vid sådd. Magasinet ökade till en i början av växtsäsongen då rotdjupet ökade. Störst skillnader mellan behandlingarna syntes under 2018. Det obevattnade ledet var nära vissningsgränsen en stor del

av växtsäsongen medan det optimalt bevattnade hade betydligt större markvattenmagasin.

År 2017 syntes skillnader i markvattenmagasinen från dag 50. Det fanns ingen tillgänglig gradering över utvecklingsstadierna i början av säsongen. År 2019 bevattnades med färre antal mm än tidigare år. De största skillnaderna i markvattenmagasin mellan de olika behandlingarna sågs mellan dag 60 och 85 (axgång och blomning).



Figur 9. Beräknade markvattenmagasin växtsäsongerna 2017, 2018 och 2019. Markvattenmagasinet ökar till en början i takt med rotdjupets beräknade ökning. Det växttillgängliga vattnet är mängden vatten mellan den övre och undre gråa linjen.

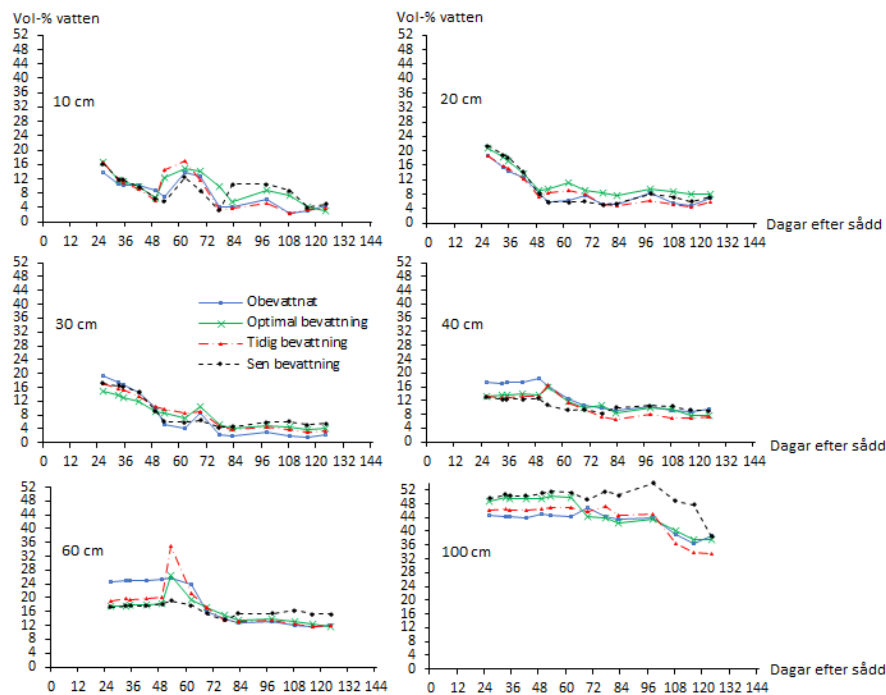
## 4.2 Markvattenhaltsmätningar

Nedan visas markvattenhaltsmätningarna i fält för respektive år och markskikt, 10, 20, 30, 40, 60 och 100 cm.

### 4.2.1 2017

I figur 10 presenteras vattenhalten i volym-% per markskikt i de respektive behandlingarna för växtsäsongen 2017. Behandlingarna följer varandra och endast små

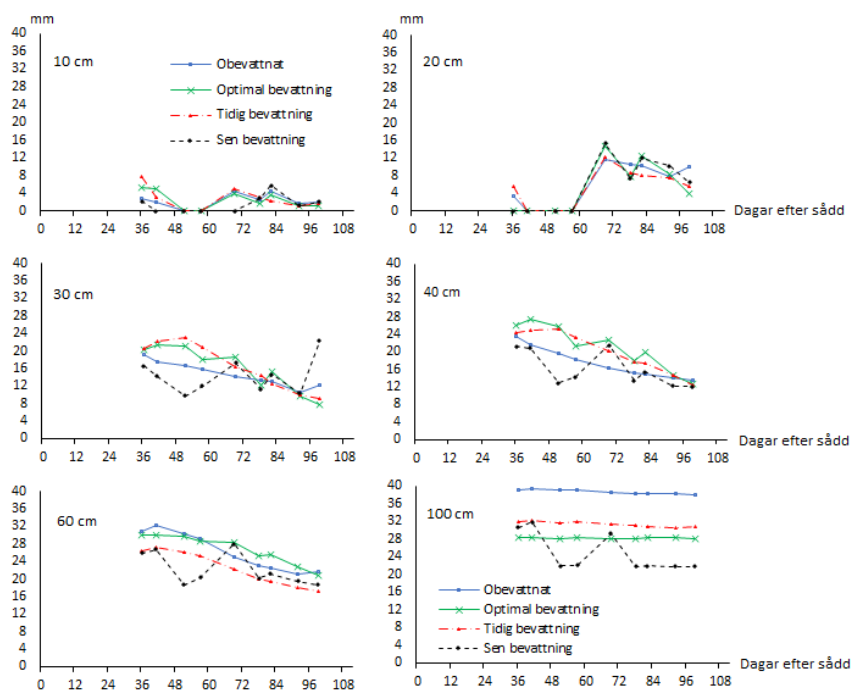
skillnader kan urskiljas. Första bevattningen skedde dag 52 och även i det obevattade ledet ökade vattenhalten i det översta skiktet efter bevattningen. På 20 cm djup syntes viss skillnad mellan behandlingarna, där tidig har högre vattenhalt i början av säsongen medan sent bevattnat har högre vattenhalt i slutet av säsongen. Optimalt bevattnade ledet hade på 20 cm djup högst vattenhalt under hela växtsäsongen. Vattenhalten minskade även på 1 meters djup vilket indikerar att rötter nått djupare än det bestämda rotdjupet.



Figur 10. Uppmått markvattenhalt (volym-%) per skikt under växtsäsongen 2017. Varje behandlings uppmätta värde består av medelvärde av de fyra upprepade leden.

#### 4.2.2 2018

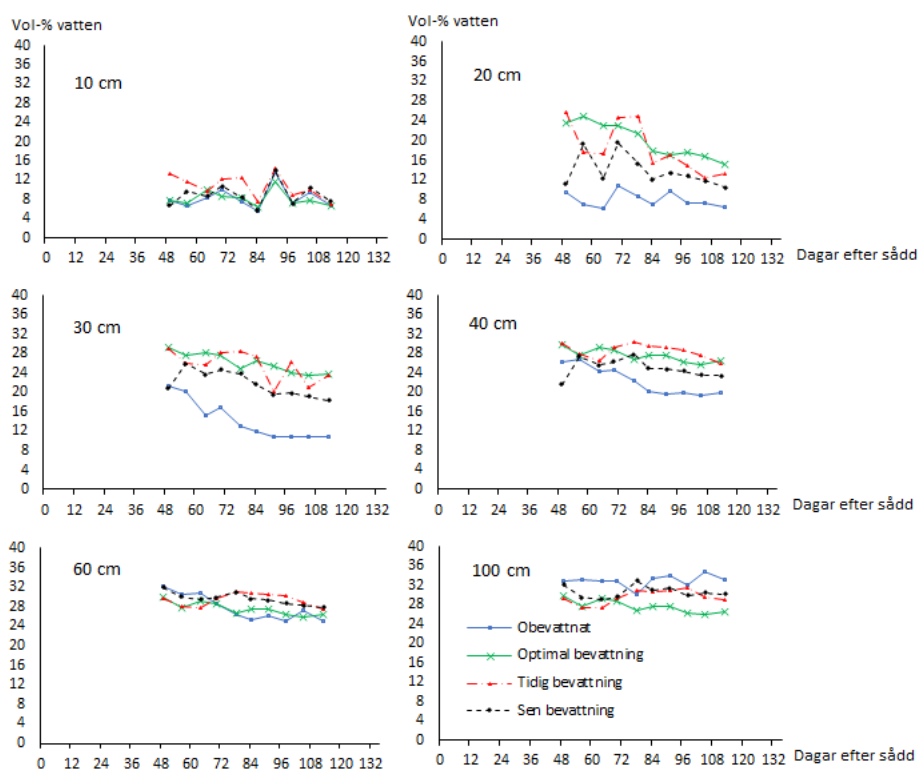
I figur 11 presenteras vattenhalten i volym-% per markskikt i de respektive behandlingarna för växtsäsongen 2018. Översta skiktet var helt torrt i alla led nästan från början till slutet av växtsäsongen och ingen effekt syntes efter bevattningen dag 41. Tydligast skillnad syntes på 30 och 40 cm skikten. I det sent bevattnade ledet ökade vattenhalten från dag 51, första bevattningen utfördes dock dag 57. Enligt observationer var antal grönskott väldigt många i det sent bevattnade ledet.



Figur 11. Uppmätt markvattenhalt (volym-%) per skikt under växstsäsongen 2018. Varje behandlings uppmätta värde består av medelvärde av de fyra upprepade leden.

#### 4.2.3 2019

Alla bevattnade led visade på goda vattenhalter i marken. Figur 12 visar vattenhaltsmätningar per skikt 2019. För djupet 10 cm ökade alla vattenhalter, oberoende behandling efter mätningen gjord dag 84. Detta stämmer bra med det nederbördsrika dygnet ett par dagar tidigare. Djupare ned i profilen liknar de olika ledens kurvor varandra vilket indikerar på liknande vattenhalter och att vattenupptaget minskat.



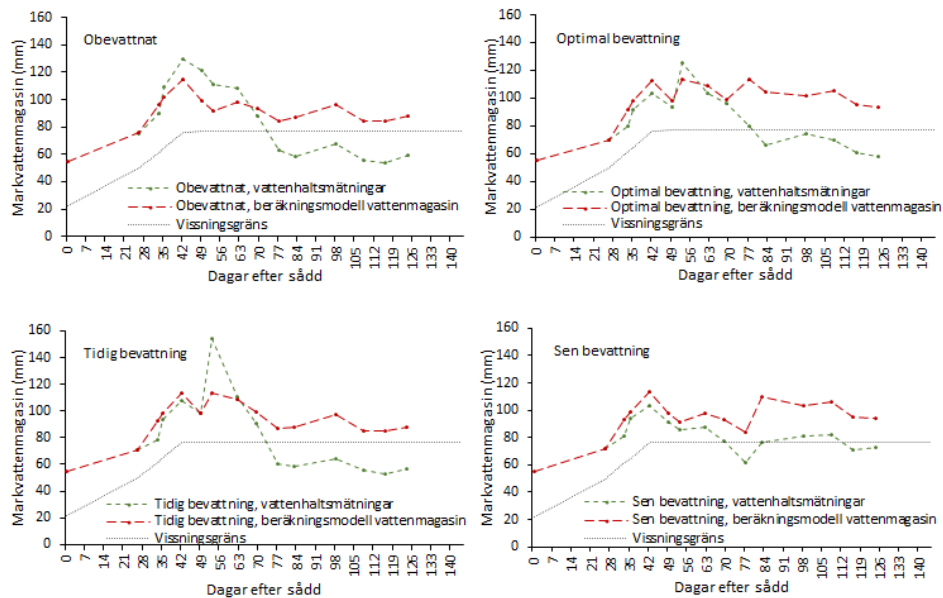
Figur 12. Uppmätt markvattenhalt (volym-%) per skikt under växstsäsongen 2019. Varje behandlings uppmätta värde består av medelvärde av de fyra upprepade leden.

### 4.3 Jämförelse av uppmätta markvattenmagasin och beräknade markvattenmagasin

Nedan visas rotzonens markvattenmagasin, både beräknat och uppmätt, för respektive år. Beräkningsmodellen utgår från värdet av säsongens första vattenhaltsmätning.

#### 4.3.1 2017

Figur 13 jämför beräknat och uppmätt markvattenmagasin för växstsäsongen 2017. Mätningarna visade generellt sett på ett mindre vattenmagasin än beräkningarna, framförallt växstsäsongens 40 sista dagar. Det uppmätta markvattenmagasinet var efter dag 70 lägre än den beräknade permanenta vissningsgränsen. Det tidigt bevattnade ledet visade på en stor ökning av markvattenmagasinet vid mätningen den 30 maj, vilket är dagen efter den första bevattningsgivan. I grafen för sen bevattning följs de båda metoderna åt på ett tillfredsställande sätt.

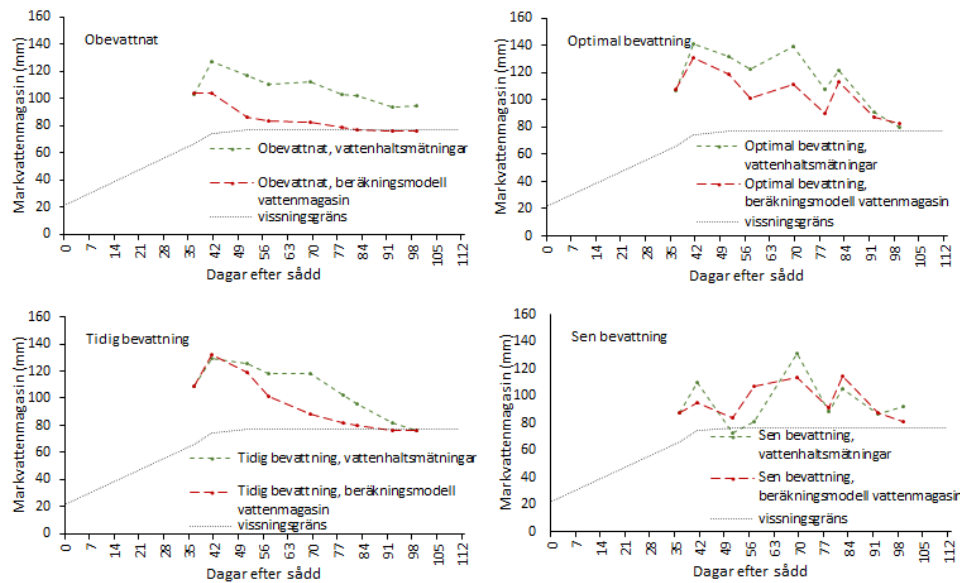


Figur 13. Uppmätt och beräknat markvattenmagasin (mm) i rotzonen 2017. Försöket såddes den 7 april och skördades den 29 augusti, dag 144. Den gråstreckade linjen motsvaras av mängden växttillgängligt vatten (ovan linjen) respektive otillgängligt vatten (under linjen). Rotdjupet är satt till 70 cm för alla bevattningsstrategier.

#### 4.3.2 2018

År 2018 visade ett större markvattenmagasin för uppmätt vattenhalt än för beräkningarna (figur 14). Alla mätningar, förutom dag 52 i det sent bevattnade ledet, hade större markvattenmagasin än den beräknade, permanenta vissningsgränsen. Förmågan att ta upp vatten har överskattats, trots att det finns vatten har det inte avdunstat då växten stängt av. Från dag 56 minskar markvattnet i det tidigt bevattnade ledet samtidigt som det ökar i det sent bevattnade ledet.

Beräkningar och uppmätta vattenmagasin följs åt då det fanns tillgängligt vatten men modellen har överskattat stressfaktorn då det finns mindre tillgängligt vatten.

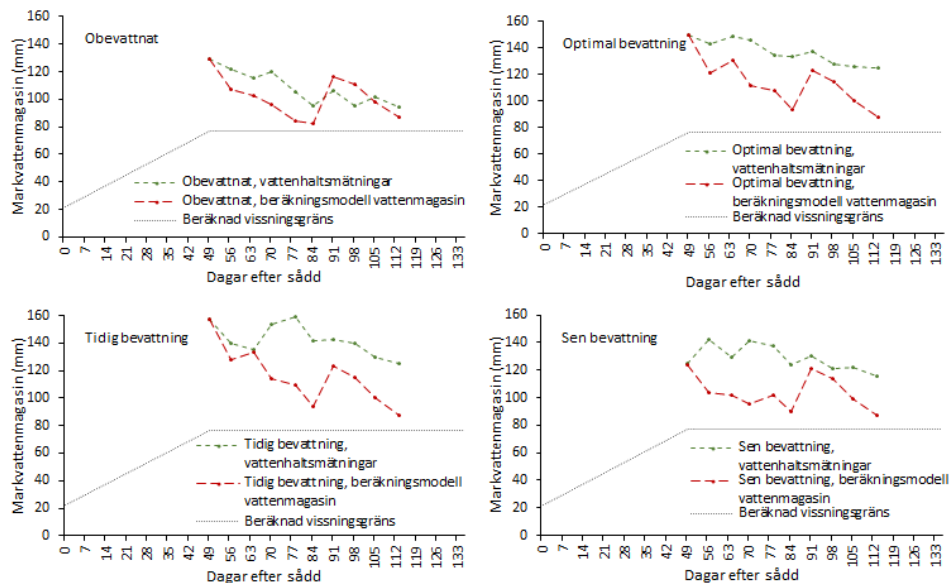


Figur 14. Uppmätt och beräknat markvattenmagasin (mm) i rotzonen 2018. Försöket såddes den 18 april och skördades den 7 augusti, dag 111. Den gråstreckade linjen motsvaras av mängden växttillgängligt vatten (ovan linjen) respektive otillgängligt (under linjen). Rotdjupet är satt till 70 cm för alla bevattningsstrategier.

#### 4.3.3 2019

I figur 15 jämförs resultaten av vattenhaltsmätningar och med beräkningar för 2019 års markvattenmagasin. Generellt sett visade mätningarna på högre markvattenmagasin än beräkningarna. Leden för optimal och tidig bevattning borde följas åt då de bevattnas likadant. Mätningarna visade inte något tydligt utslag på nederbörden som kom dag 86 (29,4 mm).





Figur 15. Uppmätt och beräknat markvattenmagasin (mm) i rotzonen 2019. Försöket såddes den 8 april och skördades den 21 augusti, dag 135. Den gråstreckade linjen motsvaras av mängden växttillgängligt vatten (ovan linjen) respektive otillgängligt (under linjen). Rotdjupet är satt till 70 cm för alla bevattningsstrategier.

## 4.4 Skörd

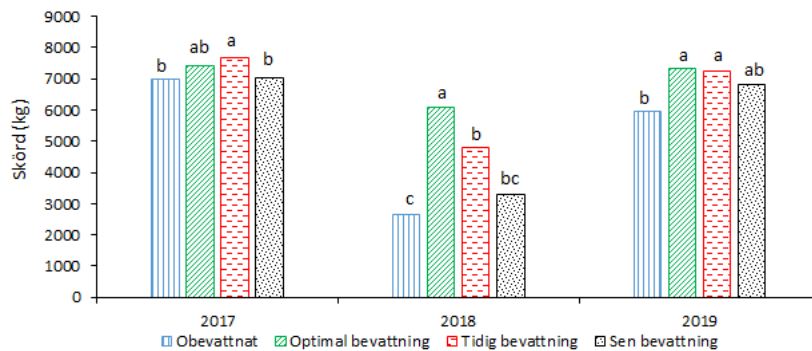
Nedan redovisas skörderesultat från fältförsök L1-266. Försöket visade på goda skördeökningar vid bevattning. En skördeökning över 10 % med en giva på 50 mm kan anses som god och visar på att det kan finnas lönsamhet att bevattna spannmål.

Åren har analyserats separat och det fanns en signifikant skillnad mellan leden alla år 2017 ( $p = 0,001$ ,  $SE = 131$ ), 2018 ( $p = 0,0001$ ,  $SE = 288$ ) och 2019 ( $p = 0,046$ ,  $SE = 282$ ). Signifikans mellan specifika led visas i figur 16. Se analys-tabeller i Bilaga II.

2017 gav generellt sett goda skördar och det tidigt bevattnade ledet gav störst skördeökning med 10 % samtidigt som det optimalt bevattnade ledet gav en skördeökning på 6 %, se tabell 6. Det fanns ingen signifikant skillnad mellan det optimalt och tidigt bevattnade ledet, men det tidigt bevattnade är signifikant högre än det obevattnade och sent bevattnade ledet.

2018, som präglades av torka, visade på störst skördeökningar i de bevattnade leden av de tre försöksåren. Det optimalt bevattnade ledet gav en skördeökning på 128 %, tidigt bevattnade ledet 79 % och sent bevattnade ledet 33 %. Det obevattnade ledet gav samma år extremt låg skörd, 2660 kg, vilket är 2 ton under normskörden för vårveteodlingar i Götalands mellanbygder (SCB, 2018).

2019 var det en signifikant skillnad mellan det obevattnade ledet och optimal och tidig bevattning. Det optimala och tidigt bevattnade ledet gav 23 respektive 22 % skördeökning. Endast block 1,2 och 4 analyserades. Trots relativt hög skörd (5948 kg) i det obevattnade ledet svarade de bevattnade leden bra på bevattningen.



Figur 16. Skördenivåer för växtsäsongerna 2017, 2018 och 2019. Åren har analyserats separat och medelfelet är 113 (2017), 288 (2018) och 266 (2019). Åren 2017 och 2018 har alla försöksblock analyserats medan år 2019 analyserades endast block 1, 2 och 4.

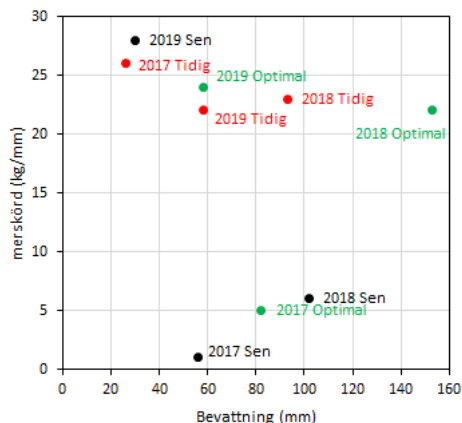
Skördeökningen i de bevattnade leden varierar i reella tal mellan 42–3430 kg ha<sup>-1</sup> vilket indikerar att utfallet av eventuell bevattning kan variera väldigt mycket beroende på årsmån (tabell 6).

Tabell 6. Skördenivåer för respektive år och behandling. Skörden är beräknad vid 15 % vattenhalt. Säsongens totala bevattningsmängd, merskörd i kg, merskörd i kg per mm bevattning samt WUE i kg skörd per  $ET_{cad}$

	Skörd (kg ha <sup>-1</sup> )	Relativt tal	Bevatt- ning (mm)	Extra skörd (kg ha <sup>-1</sup> )	Merskörd (kg mm <sup>-1</sup> )	WUE ( kg mm <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> )	Antal skott (st. m <sup>-2</sup> )	Axantal (st. m <sup>-2</sup> )
<b>2017</b>								
Obevattnat	6983	100	0	-	-	31,6	831	665
Optimal	7415	106	82	432	5	24,7	1033	823
Tidig	7673	110	26	690	26	31,1	925	732
Sen	7025	101	56	42	1	25,6	1015	824
<b>2018</b>								
Obevattnat	2660	100	12	-	-	17,6	646	439
Optimal	6090	228	153	3430	22	22,0	978	558
Tidig	4810	179	93	2150	23	21,0	989	610
Sen	3300	133	102	640	6	14,2	618	746
<b>2019</b>								
Obevattnat	5948	100	0	-	-	24,5	787	488
Optimal	7313	123	58	1364	24	23,8	836	567
Tidig	7249	122	58	1300	22	23,0	792	636
Sen	6792	114	30	844	28	24,3	817	523

I figur 17 presenteras den merskörd bevattningen ger upphov till. År 2017 gav den sena bevattningen endast 1 kg skördeökning per mm bevattning medan tidig bevattning gav en ökning på 26 kg per mm. 2018 gav den tidiga bevattningen en skördeökning på 23 kg per mm bevattning medan den sena 6 kg mm. 2019 har det sena ledet en skördeökning på 28 kg per mm bevattning. Ledet har också bevattnats med

en totalt mindre mängd vatten, 30 mm istället för 58 mm som det tidiga och optimala ledet fick.



Figur 17. Bevattning och den merskörd ( $\text{kg mm}^{-1}$ ) det ger upphov till. Grön färg motsvaras av optimal bevattning, röd av tidig bevattning och svart av sen bevattning.

WUE hänvisas ofta till i internationell litteratur, varierar i försöket mellan 14,2 och 31,6  $\text{kg mm}^{-1}\text{ha}^{-1}$  (tabell 6).

I tabell 6 presenteras antal skott och ax per  $\text{m}^2$ . Flest skott har det sent bevattnade leden 2017 och 2019. 2018 har det tidigt bevattnade ledet flest skott men sedan färre ax än det sent bevattnade, vilket beror på de torra förhållanden som sedan rådde. Det sena ledet har flera ax, men trots detta en lägre skörd än de andra bevattnade leden. Det är ingen stor skillnad i reducering av antalet ax jämfört med antalet skott mellan de olika leden. Det är det sena ledet år 2018 som skiljer sig jämfört med övriga år och behandlingar med fler ax än skott. Övriga år och behandlingar har reducerat antalet skott som utvecklades till ax.

## 5 Diskussion

I denna uppsats studerades effekterna på markvattenbalans och skörd av tillskottsbevattning i fältförsök L1-266. Att utvärdera fältförsök är komplicerat då det är biologiska system med många faktorer som varierar. Samtidigt möjliggör fältförsök studier av samspelseffekter som inte kan studeras i helt styrda miljöer.

### 5.1 Beräkningsmodell för vattenbalans och markvattenmagasin

Dagliga vattenbalansberäkningar ger en relativt god uppskattning av markvattenmagasinet och resultatet visar på förhållandevis små markvattenmagasin jämfört med fältkapacitet alla tre åren. I beräkningarna har en gräns för vattenstress satts som säger att när vattenmängden i jordprofilen är mindre än gränsen uppstår stress och då sjunker vattenupptaget och transpirationen. Valet av gräns kommer att ha en direkt påverkan på beräkningar av växttillgängligt vatten. Skulle gränsen höjas till 50 % skulle det innebära att grödan blir stressad mycket tidigare, förbrukar mindre vatten och att påverkan på skörden blir större.

Vattenhaltsmodeller är ofta en sub-modell av väder- och klimatmodellering. Här har modellen för beräkning av  $ET_c$  adj och markvattenmagasin grundas på FAO nr 56 riktlinjer. I Sverige finns många väderstationer men få med alla variabler som krävs för att beräkna ET med PM-ekvationen. Väderstationen som användes i studien låg 9 km från försöksplatsen och hade heltäckande information för PM-ekvationen. Väder är lokalt och framförallt regnskurar kan variera inom relativt små områden. Overifierad uppmätt nederbörd på försöksplatsen 2017 är till exempel betydligt högre än Hallfredas officiella siffror. En enkel nederbördsjäkmätare i anslutning till försöket hade förbättrat vattenbalansberäkningarna.

För att beräkna mängden växttillgängligt vatten krävs markdata. Jordprover är tagna på platsen men tyvärr inte färdiganalyserade. Istället för markdata från platsen

användes data från en liknande jord i Hakuse, Gotland. Detta kan ha påverkat beräkningen av jordens torra skrymdensitet och vattenhållande förmåga och därmed beräkningarna av växttillgängligt vatten.

I försöket skulle rotdjup ha mätts under säsongerna vilket inte skett. Detta gjorde att samma rotdjup, 70 cm, användes i alla beräkningar av markvattenmagasin för alla år. Det är inte troligt att rotdjupet var detsamma i alla bevattningsstrategier och år och detta borde ha visats i figur 10–12. Detta kan inte urskiljas vilket snarare kan bero på mätningarnas felkällor. Rotdjupet påverkar markvattenmagasinet i stor utsträckning och en förfinad uppskattning av rotdjupet hade förbättrat beräkningarna av markvattenmagasinen avsevärt.

Ett stort fokus i uppsatsen har varit att studera vattenbristens stressfaktor. Effekten av stressfaktorn syns tydligt i beräkningsmodellen och när grödan börjar påverkas av vattenstress minskas ET kraftigt. Figur 6,7 och 8 visar att stressfaktorn har en stor procentuell påverkan på evapotranspirationen i slutet av växtsäsongen. ET halveras av stressfaktorn under avmognadsfasen. I praktiken blir stressfaktorns betydelse låg då evapotranspirationen avtar till låga nivåer under avmognadsfasen.

## 5.2 Mätning av markvattenhalt

Att mäta vattenhalter i marken är svårt och det saknas en enkel metod för detta. Vatten kan röra sig i makroporer och inte jämnt fördelat över fältet. Försökets mätningar av markvattenhalten har kantats av flera problem. Mätvärdena varierar väldigt mycket inom respektive behandling och det är svårt att dra någon slutsats utifrån genomförda mätningar. Det har också dröjt ett flertal veckor innan säsongens första mätning är gjord. 2019 dröjde det 49 dagar innan första mätningen genomfördes vilket gör att kunskap om vattenhalter under säsongernas första del saknas.

Det är svårt att se någon skillnad i markvattenhalt mellan behandlingarna på respektive djup. Viss skillnad syns på 30 cm djup där rotdensiteten är hög och ingen avdunstning sker. År 2017 följer de olika behandlingarnas markvattenhalter på respektive djup varandra och inga tydliga skillnader kan utläsas. 2018, som var ett extremt torrt år har högre mätvärden än 2017. Det kan delvis bero på att den kapillära upptransporten av vatten brutits då det varit väldigt torrt i det översta markskiktet.

2019 års mätvärden ser bättre ut, både i relation till fältobservationer och säsongens väder. Dock borde mätvärdena för det tidiga och optimalt bevattnade ledet följa varandra då de fått exakt samma behandling. Enligt resultatet ser rotdjupet ut att vara mindre än det beräknade då inget vatten verkar ha tagits upp från de djupare skikten. Den kapillära transporten var förmodligen inte lika stor 2019 som 2018 då det inte var lika torrt i de övre markskikten.

### 5.3 Jämförelse mellan beräkningar och mätningar av markvattenmagasinet

De uppmätta markvattenmagasinen i relation till de beräknade markvattenmagasinen skiljer sig mycket över åren. I en studie från Gassman med flera (2011) visade att då de använde riktlinjerna från FAO nr 56 överskattades beräknade Kc-värden jämfört med observationer. I den här studien är inte alltid beräkningarna överskattade jämfört med mätningarna utan det varierar mellan åren.

Det kan i praktiken inte vara möjligt för uppmätta markvattenmagasin att vara under gränsen för den permanenta vissningsgränsen vilket visar på att åtminstone en av metoderna innehåller felkällor med stor påverkan på resultatet. Detta gäller framförallt växtsäsongen 2017 då mätningarna under säsongens senare del visar på mindre markvattenmagasin än vad som beräknat är växttillgängligt. Mer vatten kan ha evapotranspirerat än modellen fångat upp, framförallt i säsongens senare del. Skillnaden kan också bero på mängden vatten i marken i början av växtsäsongen eller att mängden växttillgängligt vatten egentligen var mindre än vad beräkningarna visar.

2018 var det uppmätta markvattenmagasinet vid ett tillfälle i det sent bevattnade ledet mindre än vad som beräknat är växttillgängligt och 2019 var alla mätningar inom det beräknade spannet av växttillgängligt vatten. 2018 befinner sig det beräknade, obevattnade ledet efter dag 50 kring den permanenta vissningsgränsen samtidigt som mätningarna visar på relativt goda vattenhalter. Detta kan ha flera förklaringar, bland annat, som nämndes tidigare, felberäknad mängd växttillgängligt vatten eller att den kapillära upptransporten kan ha brutits. Men det kan bero på andra orsaker såsom att växten stängde av sitt vattenupptag på grund av omgivande temperatur snarare än total vattenbrist.

Även försökets sista säsong, 2019, är det uppmätta markvattenmagasinet större än de beräknade magasinerna. De bevattnade leden har alla större vattenmagasin än det obevattnade vilket borde stämma med verkligheten.

Det är inte fastlagt vilken metod som är närmast den faktiska vattenhalten. Vanligtvis brukar mätningar användas för att kontrollera beräkningar men för det krävs säkrare mätvärden som den här studien inte kan visa på. Fler studier behöver göras och metodikerna kräver djupare utvärderingar.

Att ha kunskap om markvattenmagasinen är viktigt för bevattningsunderlaget för svensk spannmål, inte minst då vattenresurshanteringen utpekats som ett område med kunskapsluckor med potential för skördeökningar (Wesström & Joel, 2014). För att tillskottsbevattning ska kunna utföras i större omfattning i spannmål krävs,

förutom resurser, mycket mer kunskap, framförallt hur mycket stress grödan klarar av innan skördesänkningen blir för stor. Full bevattning kommer nog aldrig bli aktuellt utan det viktiga är att veta när grödan klarar stress och när skördereduktionen blir för stor.

## 5.4 Tillskottsbevattningens effekt på skörden

Studien visar generellt sett på goda skörderesultat med en genomsnittlig skördeökning för alla bevattnade led med 35 %. Detta är intressant då bevattning av spannmål är omdiskuterat. Den genomsnittliga skördeökningen innefattar 2018 års skördar, om endast 2017 och 2019 studeras är den genomsnittliga skördeökningen 12 %. Enligt Wesström och Joel (2014) kan tillskottsbevattning i rätt utvecklingsstadium öka skörden med 15 % och vid en exkludering av 2018 års skörd stämmer denna studie med resultaten från Wesström och Joels uppskattning. Studiens exceptionella skördeökning 2018 ska inte beaktas utifrån ett enskilt år men tyder på hur viktig bevattning kan bli om växtsäsongerna blir torrare.

Boogaard med flera (2013) simulerade den potentiella skördeökningen vid bevattning i norra Europa till drygt 2 ton ha<sup>-1</sup>. Extraskörden i denna studie uppnår till detta 2018 men ej resterande år. Boogaards simulering är ej platsspecifik men simuleringar kan säga var bevattning har potential på makronivå.

Den här studien visade på stora variationer i skördeökning mellan både behandlingar och år men en skördeökning på 10 % är mycket och kan vara en viktig aspekt vid fortsatt utveckling av spannmålsodlingen i södra Sverige. Försommartorka är vanligt i stora delar av Sverige och är det torrt i början av säsongen ger tidig bevattning ett bättre vattenutnyttjande än optimal och sen bevattning.

För att utvärdera bevattningens effekt krävs nyckeltal. WUE används internationellt och enligt Sadras och Angus (2006) kan den maximala effektiviteten inte vara högre än 22 kg mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>. Deras studie grundar sig på en sammanställning över veteproduktion och faktisk evapotranspiration i Kina, Medelhavsområdet, Sydöstra Australien och Nordamerika. Den här studien visar på en högre WUE men vid en mer specifik jämförelse måste de ingående variablerna studeras.

Att kunna utvärdera effekter är viktigt ur flera hänseenden men då det i Sverige inte är torrt hela säsongen kan den merskörd som fås vid bevattning vara ett bättre nyckeltal. Högst merskörd per mm bevattning i studien hade leden med en bevattning (tidig 2017 och sen 2019).

Åren 2017 och 2019 hade relativt liknande väderförutsättningar och båda åren gav de behandlingar som endast fick en bevattning högst merskörd per mm bevattning. Hög merskörd hade också de optimalt och tidigt bevattnade leden 2018. Det visar, att om bevattningsmöjligheter finns, kan även relativt stora mängder vatten



vara aktuellt. Även 2019 gav det tidigt och optimalt bevattnade leden en god mer-skörd vilket bekräftar att bevattning vid mer en normal säsongsnederbörd också är aktuellt.

Skörden varierar mellan åren och trots högst nederbörd 2019 är skörden 1 ton lägre än 2017. Vad som hämmat skördeutvecklingen 2019 kan inte denna studie svara på men förmodligen har föregående års torka påverkat vattenmagasinen vid sådd i stor utsträckning och därmed haft en inverkan på skördeutvecklingen. Beräkningar och uppmätta vattenhalter utgick dock samtliga år från fältkapacitet vid sådd.

När bevattning i relation till grödans utveckling ska ske är inte klargjort. Tyvärr är grödans gradering av utveckling i försöket dåligt dokumenterat. Det hade varit intressant om grödans utvecklingsstadie graderats flera gånger för att kunna koppla samman bevattningstidpunkt med utvecklingsstadie. Från 2018 finns ingen gradering tillgänglig vilket hade varit intressant då det obevattnade ledet brådmognade och sent bevattnade ledet fick en stor mängd grönskott. Den förmodade skillnaden i utveckling mellan alla fyra led hade varit intressant att följa.

När vattenstress infaller påverkar olika delar av grödans utveckling. Tidig stress reducerar axantalet (Passioura & Angus, 2010) men det kan inte visas i den här studien. Vid allvarig stress brådmognar grödan (Passioura & Angus, 2010) vilket syns tydligt under 2018. Samma år, i det sent bevattnade ledet, visas att en ojämn vattentillgång skapar grönskott vilket leder till en sämre kvalitet (Emmerman *et al.*, 1990). Relationen mellan grödans utveckling och bevattning vore intressant att fortsätta studera för att utveckla en bättre bevattningsplanering. Den här studien visar på att bevattning kan jämna ut vattentillgången vid en bra planering samtidigt som bevattning kan men ge motsatt effekt och sämre skördekvalitet vid en misslyckad planering. Detta syns tydligt vid det sent bevattnade ledet 2018 då bevattning hade behövt sättas in tidigare för att ge effekt.

Studien visade att bevattning gav god effekt på skörden men att resultatet är osäkrare för markvattenbalansen. Det visar att en modell inte alltid beskriver verkligheten. Det är tydligt 2018 då modellen visar att grödan återhämtar sig relativt bra vid bevattning. I det sent bevattnade ledet återhämtar sig stressfaktorn samtidigt som skörden endast är 640 kg högre än det obevattnade ledet (2660 kg). I verkligheten visas återhämtningen i form av i det stora antal grönskott som inte hann mogna till skörd. Skörden relaterar dock också dåligt till mätningarna av markvattenmagasinen som inte visar på att det är sådan extrem vattenbrist 2018. Detta beror bland annat på att det uppskattade rotdjupet förmodligen är överskattat då mätningarna visar på vatten djupare ned i profilen och att rötterna därmed inte når ned till 70 cm djup.

## 5.5 Utvecklingsmöjligheter för svensk spannmålsbevattning

Som tidigare nämnts finns det en viss potential för bevattning av spannmål i Sverige, framförallt i områden som ofta drabbas av försommartorka. Kompetensutvecklingen inom hela kedjan, från forskning till praktik, behöver förbättras. Utifrån denna studie ses dessa områden som särskilt viktiga för ett förbättrat bevattningsunderlag:

- Fler effektstudier för att visa när bevattning ska tillsättas och vilken skördeökning som är möjlig
- Säkrare, kostnadseffektiva vattenhaltsmätningar
- En beräkningsmodell grundad på svenska förutsättningar
- Utveckling av en programvara som kan användas av branschen för bättre bevattningsplanering
- Säkrare väderprognoser för att enklare prognosticera bevattningsbehovet

## 6 Slutsatser

Studien visar på goda skördeeffekter av tillskottsbevattning i vårsäd. Samtidigt visar studien på komplexiteten med att uppskatta markvattenmagasinet. Genom denna studie har ett flertal frågor aktualiserats som kräver vidare forskning, framförallt i upprepade fältförsök. Strategier för om, och när, spannmål ska bevattnas behöver utvecklas.

I uppsatsens början ställdes ett antal huvudfrågor och utifrån dessa kan följande slutsatser dras:

- I. Vattenbalansberäkningar visar på relativt goda uppskattningar om markvattenmagasinen i rotzonen. Det problematiska i det praktiska lantbruket är den omfattande indata i form av rotdjup, mark- och väderdata som krävs. Förenklingar i klimatdata borde kunna användas, sårare, men eftersträvarsvärt vore generella data för olika typjordar.
- II. Vattenbristens stressfaktor påverkar ET i stor utsträckning och kan ha överskattats vid låga vattenhalter och i slutet av växtsäsongen då grödan naturligt mognar av.
- III. Metodiken över mätningar av markvattenhalten behöver utvärderas men borde vara ett bra komplement för att utveckla vattenbalansberäkningarna.
- IV. Försöket visade på en god kvantitativ skördeökning vid tillskottsbevattning av vårsäd med 10–25 % skördeökningar vid tidig eller optimal bevattning. Om det råder försommartorka kan därmed en tidig bevattning i spannmål ge bra utfall på skörden. Extremt torra år visade försöket på upp till 128 % skördeökning vid optimal bevattning. Merskörden varierar dock 1–28 kg mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> mellan år och behandling. Hur olika bevattningsstrategier påverkar merskörden borde studeras närmare då det är viktigt ur lantbrukares perspektiv.

## Referenslista

Allen, R. G. *et al.* (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements, *Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO. Rome, (56), p. 300.

Bernes, C. (2016) *En varmare värld - Växthuseffekten och klimatets förändringar*. Tredje uppl. Stockholm: Naturvårdsverket.

Boogaard, H. *et al.* (2013) 'A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union', *Field Crops Research*. Elsevier B.V., 143, pp. 130–142.

Boutraa, T. *et al.* (2010) 'Plant Physiology Effect of water stress on growth and water use efficiency ( WUE ) of some wheat cultivars ( Triticum durum ) grown in Saudi Arabia .', *Journal of Taibah University for Science*. Taibah University, 3, pp. 39–48.

Chapman, L. (2019) *Irrigation Systems, Technology and Impacts*. New York: Syrawood Publishing House.

Charles, H. *et al.* (2019) *Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People*. Available at: <http://science.sciencemag.org/> (Accessed: 14 October 2019).

Devices, D.-T. (2016) 'Profile Probe User Manual 5.0'.

Elmqvist, H. and Arvidsson, J. (2014) *Höstvete mot nya höjder*, Swedish University of Agricultural Sciences. Stockholm.

Emmerman, A. *et al.* (1990) *Växtodling I Marken*. Borås: LT Förlag AB.

Eriksson, J. *et al.* (2011) *Marklära*. 1:3. Malmö: Studentlitteratur AB.

Erpenbeck, J. M. (1982) *Irrigation Scheduling - A Review of Techniques and Adaption of the USDA Irrigation Scheduling Computer Program for Swedish Conditions*. Uppsala.

FAO (2017) *Water for Sustainable Food and Agriculture Water for Sustainable Food and Agriculture, A report produced for the G20 Presidency of Germany*. Rome.

Farooq, M. and Siddique, K. H. M. (2017) *Innovations in dryland agriculture, Innovations in Dryland Agriculture*.

Ferreira, M. I. *et al.* (2012) 'Crop and stress coefficients in rainfed and deficit irrigation vineyards

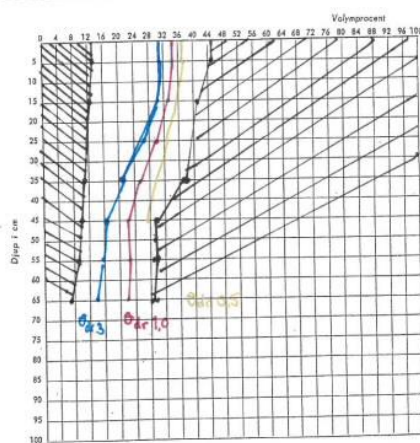
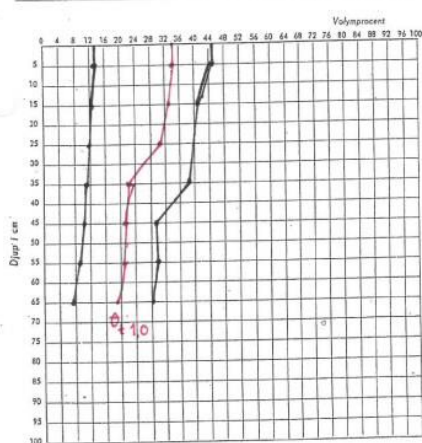
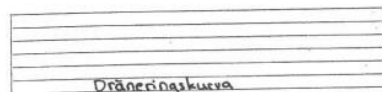
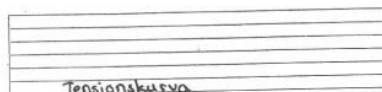
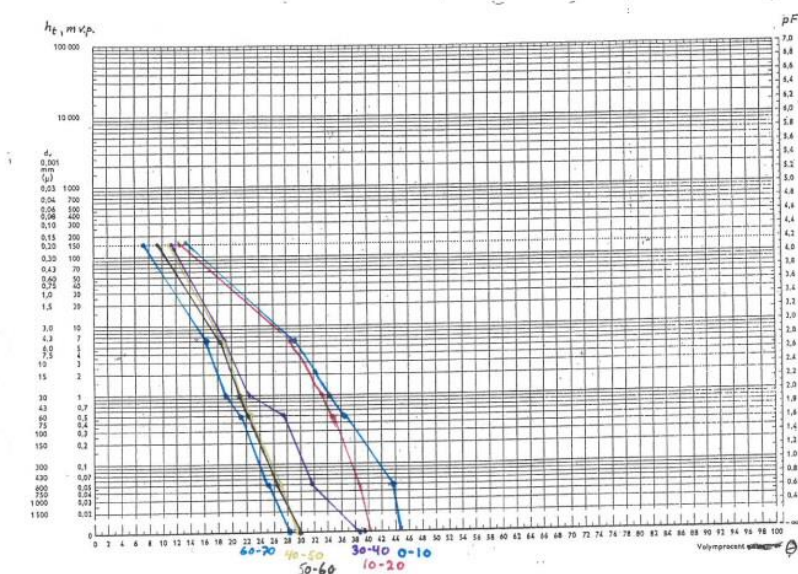
- using sap flow techniques', *Irrigation Science*, 30(5), pp. 433–447.
- Fischer, R. . (1979) 'Growth and Water Limitation to Dryland Wheat in Australia: a Physical Framework', *The Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 45(2), pp. 83–93.
- Fogelfors, H. (2015) *Vår mat - odling av åker- och trädgårdsgrödor*. 1:1. Lund: Studentlitteratur AB.
- Garcia, M., Raes, D. and Jacobsen, S. E. (2003) 'Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands', *Agricultural Water Management*, 60(2), pp. 119–134.
- Gassmann, M., Gardiol, J. and Serio, L. (2011) 'Performance evaluation of evapotranspiration estimations in a model of soil water balance', *Meteorological Applications*, 18(2), pp. 211–222.
- Geerts, S., Raes, D. and Garcia, M. (2010) 'Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules', *Agricultural Water Management*.
- Gianuzzi, M. (2017) 'Lantmännen satsar på durumvete', *ATL*. Available at: <https://www.atl.nu/lantbruk/lantmannen-satsar-pa-durumvete/>.
- Grip, H. and Rodhe, A. (2009) *Vattnets väg från regn till bäck*. Karlshamn: Hallgren och Fallgren Studieförlag AB.
- Hansson, P. (2012) 'Vatten begränsar svenska skördar', *Arvensis*, April, pp. 16–17.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985) 'Reference Crop Evapotranspiration From Ambient Air Temperature.', *Paper - American Society of Agricultural Engineers*, 4(May), pp. 96–99.
- IAEA (2008) *Field Estimation of Soil Water Content*. Vienna.
- Johansson, W. and Linnér, H. (1977) *Bevattnings Behov-Effekter-Teknik*. Borås: LT Förlag AB.
- Jong, R. De and Bootsma, A. (1996) *Review of recent developments in soil water simulation models, Canadian Journal of Soil Sciences*.
- Jordbruksverket (2018) *Jordbrukets beov av vattenförsörjning*.
- Jordbruksverket (2019) *Jordbruksmarkens användning 2019*.
- Kadkol, G. P. and Sissons, M. (2016) 'Durum Wheat Overview', in *Reference Module in Food Science*.
- Kang, S. *et al.* (2003) 'Simulation of winter wheat yield and water use efficiency in the Loess Plateau of China using WAVES', *Agricultural Systems*, 78(3), pp. 355–367.
- Klepper, B. (1991) 'Crop root system response to irrigation', *Irrigation Science*, 12, pp. 105–108.
- Kumari, S. and H. M. Rawson, H. M. R. (2012) 'Temperature, Vapour Pressure Deficit and Water Stress Interaction on Transpiration in Wheat', *International Journal of Scientific Research*, 2(3), pp. 375–376.
- Lal, R. (2004) 'Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security', *Science*, 304, pp. 1623–1627. Available at: [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org) (Accessed: 11 November 2019).

- LantMet (2019) 'No Title'. LantMet/Fältforsk. Available at: <http://www.ffe.slu.se/lm/LMHome.cfm?LMSUB=1>.
- Linnér, H. (1986) *Bevattnings för optimering av tillväxt, kvalitet och växt-näringsutnyttjande*. Allmänt 84, *Konsulentavdelningens rapporter*. Allmänt 84. Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet, Avdelningen för hydroteknik.
- Lyra, Gustavo Bastos *et al.* (2016) 'Soil water stress co-efficient for estimating actual evapotranspiration of maize in northeastern Brazil', *Meteorological Applications*, 23(1), pp. 26–34.
- Marshall, T. J. and Holmes, J. W. (1988) *Soil Physics*.
- Mattson, L. (2009) *RESULTAT Kväve och bevattnings i malkorn (Resultatkort)*. Kristiansstad: SLU, Mark och miljö, växtnäring. Available at: <http://www.skaneforsoken.nu/dokument/skorderesultat03L125.pdf>.
- Mattson, L. (2010) *RESULTAT Kväve och bevattnings i malkorn (resultatkort)*. Kristianstad: SLU, Mark och miljö, växtnäring. Available at: <http://www.skaneforsoken.nu/dokument/skorderesultat03M123.pdf>.
- Mbow, C. *et al.* (2019) 'Climate change and land. Chapter 5: Food Security', *IPCC SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 °C*, pp. 1–200. Available at:
- Muñoz-carpena, R. (2015) 'Field Devices For Monitoring Soil Water Content 1', (June).
- Nangia, V. *et al.* (2018) *Supplemental Irrigation: A Promising Climate-Smart Practice for Dryland Agriculture*. Available at: <http://www.fao.org/3/I9022EN/i9022en.pdf> (Accessed: 4 September 2019).
- Oweis, T. (2014) *Supplemental Irrigation, A Highly Efficient Water-use Practice*. Aleppo: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas.
- Passioura, J. B. and Angus, J. F. (2010) 'Improving Productivity of Crops in Water-Limited Environments', in *Advances in Agronomy*.
- Paulsen, G. . and Shroyer, J. . (2004) 'Wheat in Relation to Its Agronomy', *Assessment*, p. 337.
- Persson, G. *et al.* (2015) 'Framtidsklimat i Gotlands län', (31).
- Raes, D. *et al.* (2006a) 'Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model', *Agricultural Water Management*, 81(3), pp. 335–357.
- Raes, D. *et al.* (2006b) 'Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model', *Agricultural Water Management*.
- Rana, G., Katerji, N. and Mastrorilli, M. (1997) 'Environmental and soil-plant parameters for modelling actual crop evapotranspiration under water stress conditions', *Ecological Modelling*, 101(2–3), pp. 363–371.
- Regeringskansliet (2016) *Att förändra vår värld : Agenda 2030 för hållbar utveckling*.
- Rockström, J. *et al.* (2010) 'Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift', *Agricultural Water Management*. Elsevier, 97(4), pp. 543–550.

- Sadras, V. O. and Angus, J. F. (2006) 'Benchmarking water-use efficiency of rainfed wheat in dry environments', *Australian Journal of Agricultural Research*, 57(8), pp. 847–856.
- SCB (2017) 'Vattenanvändningen i Sverige 2015'. Available at: [https://www.scb.se/contentassets/bcb304eb5e154bdf9aad3fbc063a0d3/mi0902\\_2015a01\\_br\\_miftbr1701.pdf](https://www.scb.se/contentassets/bcb304eb5e154bdf9aad3fbc063a0d3/mi0902_2015a01_br_miftbr1701.pdf).
- SCB (2018) 'Normskördar för skördeområden, län och riket 2018', JO 15 SM 1. doi: 1404-5834.
- Shaozhong, K., Huanjie, C. and Jianhua, Z. (2000) 'Estimation of maize evapotranspiration under water deficits in a semiarid region', *Agricultural Water Management*, 43(1), pp. 1–14.
- Steduto, P. *et al.* (2012) *FAO Drainage Paper 66: Crop yield Response to Water*. Rome.
- Sun, H. Y. *et al.* (2006) 'Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain', *Agricultural Water Management*, 85(1–2), pp. 211–218.
- United Nation (2019) *World Population Prospects 2019*. New York. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Weidow, B. (1998) *Växtodlingens grunder*. LT Förlag AB.
- Wesström, I. och Joel, A. (2014) Kapitel 5. Bevattning och Dränering. Red.: H. Elmquist och J. Arvidsson, J. I: *Höstvete mot nya höjder, Swedish University of Agricultural Sciences*. Stockholm.
- Zhang, H. and Oweis, T. (1999) 'Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region', *Agricultural Water Management*.
- Zhao, Z., Huang, X. and Xu, J. (2013) 'T n : t e i w y g s', 29(3), pp. 335–342.

# Bilaga I

Uppritad pF-kurva för Hakuse-jorden.





## Bilaga II

Försökets 4 olika bevattningsgivor:

Behandling A: Obevattnat

Behandling B: Optimal bevattning

Behandling C: Tidig bevattning

Behandling D: Sen bevattning

### 2017

#### Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Behandling	N	Mean	Standard error	Grouping	
B	4	7672,5	113	A	
C	4	7415,0	113	A	B
D	4	7025,0	113		B
A	4	6982,5	113		B

*Means that do not share a letter are significantly different.*

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Behandling	3	1 302 625	434 208	8,49	0,005
Block	3	1 298 275	432 758	8,47	0,005
Error	9	460 075	51 119		
Total	15	3 060 975			

### 2018

#### Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Behandling	N	Mean	Standard error	Grouping	
B	4	6051,22	288	A	
C	4	4765,50	288		B
D	4	3541,21	288		B C
A	4	2655,89	288		C

*Means that do not share a letter are significantly different.*

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Behandling	3	26 214 557	8 738 186	26,28	0,000
Block	3	1 703 982	567 994	1,71	0,234
Error	9	2 992 417	332 491		
Total	15	30 910 956			

### 2019

#### Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

C2	N	Mean	Standard error	Grouping	
B	3	7313	266	A	
C	3	7249	266	A	
D	3	6791	266	A	B
A	3	5948	266		B

*Means that do not share a letter are significantly different.*

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Behandling	3	3 561 743	1 187 248	4,96	0,046
Block	2	268 430	134 215	0,56	0,598
Error	6	1 437 022	239 504		
Total	11	5 267 195			